doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2024.06.001
王志炜,魏宇,刘宏元,等.不同种类改性纤维素与生物炭配施对黄淮海平原土壤的改良效果[J].中国农业气象,2024,45(6):571-583

不同种类改性纤维素与生物炭配施对黄淮海平原土壤的改良效果*

王志炜[1], 魏　宇[1], 刘宏元[2**], 王春鑫[3**], 陈　峰[2], 赵光昕[4]
（1.山东省国土生态修复中心，济南 250100；2.山东省农业科学院湿地农业与生态研究所，济南 250100；3.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，北京 100081；4.北京科技大学天津学院，天津 301830）

摘要：在人工气候温室，以旱稻为供试作物，以改性纤维素和生物炭为土壤改良剂，采用盆栽实验，分析改性纤维素、生物炭以及二者配施对土壤理化性质、养分、水分以及旱稻萌发的影响。实验设置对照组 CK（不添加改性纤维素和生物炭）、施加质量分数为 0.05%的 3 种改性纤维素（CMC-NH_4、CMC-Na 和 CMC-K，分别标记为 A1、B1 和 C1）、施加质量分数为 0.10%的 3 种改性纤维素（分别标记为 A2、B2 和 C2）、施加质量分数为 0.50%的生物炭（D1）、质量分数为 0.05%的 3 种改性纤维素与质量分数为 0.50%的生物炭配施（分别标记为 A1D1、B1D1 和 C1D1）、质量分数为 0.10%的 3 种改性纤维素与质量分数为 0.50%的生物炭配施（分别标记为 A2D1、B2D1 和 C2D1），共 14 个处理，测定不同处理对土壤理化性质、养分、水分流失量、旱稻萌发的影响。结果表明：与 CK 相比，A1 和 A2 处理均可以降低土壤 pH 值，分别达 0.20 和 0.17 个单位，而 B1、B2、C2 和 D1 处理均可以增加土壤 pH 值，分别达 0.32、0.43、0.20 和 0.42 个单位；与单施改性纤维素相比，CMC-NH_4 和 CMC-K 与生物炭配施有增加土壤 pH 的趋势，而 CMC-Na 与生物炭配施对土壤 pH 无显著影响。与 CK 相比，A1、A2、B1 和 B2 处理均可以显著增加土壤紧实度，分别达 13.69%、22.90%、99.66%和 113.58%；单施 3 种改性纤维素均在不同程度增加了土壤成块性和土壤表层结皮；A1D1、A2D1、B1D1 和 B2D1 处理均可以在一定程度上降低土壤紧实度，分别达 8.88%、11.78%、14.95%和 14.24%，同时与单施改性纤维素相比，A1D1、A2D1、B1D1、B2D1、C1D1 和 C2D1 处理也可以降低土壤表层结皮厚度，分别降低了 52.55%、60.59%、29.94%、38.65%、43.54%和 45.20%。与 CK 相比，A2 和 A2D1 处理均可以显著增加土壤铵态氮含量，分别达 275.84%和 48.99%；而 C1、C2、C1D1 和 C2D1 处理均显著降低了土壤铵态氮含量，分别达 51.01%、53.02%、41.61%和 45.64%。单施 3 种改性纤维素和生物炭均在不同程度上增加了土壤硝态氮、速效磷、速效钾的含量，分别达 9.01%～47.66%、17.94%～62.46%和 11.44%～88.76%；而 3 种改性纤维素与生物炭配施也均增加了土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量，分别达 22.80%～34.87%、21.84%～64.20%和 10.04%～95.72%，整体来看，3 种改性纤维素与生物炭配施更有利于土壤养分的增加。与 CK 相比，仅 A2D1、B1D1 和 B2D1 处理显著降低了累计土壤水分流失量，分别达 8.86%、6.33%和 6.33%，其余处理无显著差异。与 CK 相比，A1、B1、C1 和 BC 处理均可以显著增加旱稻生物量，分别达 203.88%、133.49%、111.16%和 18.93%；单施 3 种高剂量改性纤维素处理中，仅 C2 处理显著增加了旱稻地上部生物量，达 71.84%；A1D1、A2D1、B1D1、B2D1、C1D1 和 C2D1 处理均可以显著增加旱稻地上部生物量，分别达 225.24%、147.57%、143.20%、138.83%、125.73%和 119.90%。综合来看，质量分数为 0.05%的 3 种改性纤维素与质量分数为 0.50%的生物炭配施可以更有效改善土壤结构、增加土壤养分和旱稻地上部生物量，可以作为旱地土壤改良手段。

关键词：改性纤维素；生物炭；土壤养分；土壤保水性；生物量

---

* 收稿日期：2023−07−17
基金项目：山东省农业科学院横向课题“黄河流域生态型水田建设工程技术标准建设”（SDMLZY2203-01）；山东省农业科学院农业科技创新工程（CXGC2023B01；CXGC2023F14）；中央级公益性科研院所基本科研业务费（BSRF202203）
** 通讯作者：刘宏元，博士，从事农田面源污染治理研究，E-mail：saasliuhongyuan@163.com；王春鑫，博士，从事药物制剂研究，E-mail：wangchunxin@caas.cn
第一作者联系方式：王志炜，E-mail：wangzhiwei01@shandong.cn

Effects of Different Kinds of Combined Application of Modified Cellulose and Biochar on Soil Improvement in the Huanghuaihai Plain

WANG Zhi-wei[1], WEI Yu[1], LIU Hong-yuan[2], WANG Chun-xin[3], CHEN Feng[2], ZHAO Guang-xin[4]

(1. Shandong Provincial Territorial Spatial Ecological Restoration Center, Jinan 250100, China; 2. Institute of Wetland Agriculture and Ecology, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 4. Tianjin College, University of Science and Technology Beijing, Tianjin 301830)

Abstract: The persistent scarcity of water resources and suboptimal nutrient utilization rates are predominant challenges in agricultural production, both in China and globally. The modified cellulose and biochar have good functions of retaining water and fertilizer in soil. Authors employed these substances as soil amendments, investigating their individual and combined effects on the soil's physicochemical properties, nutrient content, moisture, and the germination of upland rice. The experiment was conducted in an artificial climate greenhouse, using upland rice as the test crop. A pot experiment was established with a control group CK (no modified cellulose or biochar), three types of modified cellulose (CMC-NH_4, CMC-Na and CMC-K) each at a 0.05% mass fraction (labelled A1, B1 and C1), a 0.10% mass fraction (labelled A2, B2 and C2), and 0.50% biochar (D1), combinations of three modified celluloses at 0.05% and 0.10% mass fractions were used with 0.50% biochar (labeled A1D1, B1D1, C1D1, A2D1, B2D1 and C2D1) across 14 treatments. These treatments on soil's physicochemical properties (pH, compactness, surface crust thickness), nutrients (ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, available phosphorus, available potassium), water loss, and upland rice germination (plant height, above-ground biomass) were analyzed. The results showed that: relative to CK, the A1 and A2 treatments reduced soil pH by 0.20 and 0.17 unit, respectively, whereas the B1, B2, C2 and D1 treatments increased it by 0.32, 0.43, 0.20 and 0.42 unit, respectively. CMC-NH_4 and CMC-K combined with biochar showed a tendency to increase soil pH, in contrast to CMC-Na combined with biochar, which had no significant impact. Compared with CK, the A1, A2, B1 and B2 treatments notably enhanced soil compactness by 13.69%, 22.90%, 99.66% and 113.58%, respectively. Each modified cellulose type, when applied singly, variably increased soil clumping and surface crust formation. The A1D1, A2D1, B1D1 and B2D1 treatments moderately reduced soil compactness (8.88%, 11.78%, 14.95% and 14.24%), and when combined with biochar, also diminished the surface crust thickness of the soil (52.55%, 60.59%, 29.94%, 38.65%, 43.54% and 45.20%). Notably, the A2 and A2D1 treatments increased soil ammonium nitrogen by 275.84% and 48.99%, respectively, while the C1, C2, C1D1 and C2D1 treatments significantly reduced it (51.01%, 53.02%, 41.61% and 45.64%). The application of modified cellulose and biochar, either singly or in combination, enhanced the soil content of nitrate nitrogen, available phosphorus, and available potassium (ranging from 9.01% to 95.72%). The combined application proved more beneficial for increasing soil nutrients. Only the A2D1, B1D1 and B2D1 treatments significantly lessened cumulative soil water loss (8.86%, 6.33% and 6.33%), with no notable differences in the other treatments. The A1, B1, C1 and BC treatments considerably augmented the biomass of upland rice, achieving increases of 203.88%, 133.49%, 111.16% and 18.93%, respectively. Among the high-dose modified cellulose treatments, only C2 significantly raised the aboveground biomass of upland rice by 71.84%. The combined treatments A1D1, A2D1, B1D1, B2D1, C1D1 and C2D1 notably enhanced the aboveground biomass of upland rice (225.24%, 147.57%, 143.20%, 138.83%, 125.73% and 119.90%). Overall, the synergistic application of 0.05% modified cellulose with 0.50% biochar markedly improves soil structure, boosts nutrient content, and enhances the aboveground biomass of upland rice. This combination is a promising approach for soil amelioration in arid regions.

Key words: Modified celluloser; Biochar; Soil nutrient; Soil water retention; Biomass

干旱已成为制约农业发展的重要原因，而且当前干旱灾害发生还具有强度大和频率高的特点[1]。黄淮海平原是中国重要的粮食主产区，其水分亏缺量季节性差异较大，干旱发生风险较高，尤以春旱发生频率较高，该地区农业生产明显受到水资源短缺的影响，常常面临水资源季节分配与作物生长需水关键期错位的双重影响[2]。因此，施用土壤保水剂是缓解水资源短缺和应对干旱发生的重要选择。

国内外研究的土壤保水剂涉及材料广泛，如高分子材料、污泥、改性纤维素、生物炭、粉煤灰、膨润土、磷酸盐化合物等，这些土壤保水剂不仅有利于水分和养分保持，还具有土壤重金属吸附、盐碱土壤改良等作用[3−6]。但是，有些土壤保水剂因其降解过程中会产生有毒物质，存在环境污染风险，在用于土壤改良时应慎重，如聚丙烯酰胺[7−8]。而改性纤维素是一种交联聚合物，具有独特的网络结构和亲水官能团，具有吸收和保存水分的能力[9]。而且，改性纤维素是秸秆再利用的形式之一，其来源于天然生物材料，降解后转变为土壤有机质，由于其生态友好性和可持续利用性越来越受到学术界重视。同时，改性纤维素与肥料配施还具有保水保肥、促进作物增产的性能，是解决水资源短缺和提高作物产量的重要手段之一[10]。但先前研究发现，改性纤维素具有极强的极性，能显著增强土壤黏合性，极易造成土壤板结，在作物出苗前施入到土壤，可能不利于作物扎根出苗[11]。生物炭作为秸秆再利用的重要形式被广泛实验于各类农田。许多研究表明，生物炭能通过自身吸附作用、改变土壤养分循环等改善土壤肥力和提高养分利用效率，同时生物炭由于具有独特的多孔结构，其在疏松土壤质地和降低土壤容重等方面也具有一定效果[12−14]。因此，本研究最终确定改性纤维素与生物炭配施作为黄淮海平原土壤改良剂，使生物炭可以弥补改性纤维素极强的极性所带来的影响，同时更好地发挥改性纤维素和生物炭保水保肥的作用。

目前尚未见改性纤维素与生物炭配施对土壤改良和作物生长的报道。因此，本研究基于改性纤维素和生物炭特性与应用基础，采集黄淮海平原的典型旱地农田土壤，通过旱稻盆栽实验研究添加不同改性纤维素、生物炭以及改性纤维素和生物炭配施对旱稻萌发和土壤理化性质的影响，以期为节水农业发展和在旱地农田的实际应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　实验材料

实验在山东省农业科学院湿地农业与生态研究所人工气候温室进行，供试土壤采自山东省农业科学院湿地农业与生态研究所济南实验站（36°42′21″N 117°4′53″E）。该区 2021 年平均气温 14.2℃，年均降水量 715mm，多集中在 6−8 月。实验用土壤采集于该区 0−20cm 耕层，pH 为 7.81，有机质 9.21g·kg^{-1}，碱解氮 48.37mg·kg^{-1}，有效磷 24.81mg·kg^{-1}，速效钾 192mg·kg^{-1}。

实验旱稻品种为泰选 1 号。供试肥料为尿素（国产，$CO(NH_2)_2$ 含量≥99.0%）和磷酸二氢钾（国产，KH_2PO_4 含量≥99.5%）。供试改性纤维素（北京产）分别为羧甲基纤维素铵（CMC-NH_4，淡黄色絮状，pH 为 6.75）、羧甲基纤维素钠（CMC-Na，白色粉末状，pH 为 8.43）和羧甲基纤维素钾（CMC-K，白色絮状，pH 为 8.08），三种改性纤维素均具有较好的保水效果，CMC-NH_4、CMC-Na、CMC-K 的蒸馏水吸水倍率分别为 102.2、49.7 和 134.9[15]。供试生物炭（BC，黑色粉末状，pH 为 8.52）由镇江某公司提供，以水稻秸秆为原料在 800℃下经不完全燃烧制成，其全氮含量为 5.21g·kg^{-1}，全磷 1.12g·kg^{-1}，全钾 17.23g·kg^{-1}，密度 0.33g·cm^{-3}，含碳量 69%。

1.2　实验设计

通过预实验和查阅相关文献，确定实验共设 14 个处理，具体见表 1，每个处理设置 3 次重复。

2023 年 1 月 25 日（实验第 1 天），称取过 6mm 筛的风干土 2kg，将改性纤维素、生物炭、肥料与土壤按实验处理设计添加并充分混匀后置入花盆，花盆内径 16.5cm，高度 17cm。每盆均匀播种 6 粒旱稻种子，盖土厚度约 1.5cm，播种后浇 200mL 蒸馏水润湿土壤。最后每盆均添加 0.21g 尿素和 0.08g 磷酸二氢钾作为肥料。

按照旱稻生长所需水分，分别在实验第 4、6、8、12、16 天浇水，每次浇水量分别为 150、150、100、100、100mL，共 800mL。实验全程在人工气候温室进行，温度为 25℃，风速为 1mg·s^{-1}，光照时长为 8h·d^{-1}。

表 1　各处理设置

Table 1　Treatments of pot experiment

处理 Treatment	施加材料 Applied material	添加重量 Add weight(g)	比例 Proportion(%)	处理 Treatment	施加材料 Applied material	添加重量 Add weight(g)	比例 Proportion(%)
CK	无添加 None	0	0	D1	BC	10	0.50
A1	CMC-NH_4	1	0.05	A1D1	CMC-NH_4+BC	1+10	0.05+0.50
A2	CMC-NH_4	2	0.10	A2D1	CMC-NH_4+BC	2+10	0.10+0.50
B1	CMC-Na	1	0.05	B1D1	CMC-Na+BC	1+10	0.05+0.50
B2	CMC-Na	2	0.10	B2D1	CMC-Na+BC	2+10	0.10+0.50
C1	CMC-K	1	0.05	C1D1	CMC-K+BC	1+10	0.05+0.50
C2	CMC-K	2	0.10	C2D1	CMC-K+BC	2+10	0.10+0.50

1.3　样品测定

实验第 4 天开始出苗，并在实验第 4、6、8、12、16、20 天进行株高监测。在实验开始和结束以及每次浇水前后均对盆栽进行称重，上一次浇水后的重量与下一次浇水前的重量的差值为当次的水分流失量，每次实验的水分流失量累加之和为累计土壤水分流失量。实验结束后，称取植株地上部干重（80℃烘干至恒定质量），即地上部生物量。用土壤紧实度仪（德国 STEPS41010）原位测定土壤紧实度；用直尺原位测定土壤表面结皮厚度；用肉眼观察土壤成块性和徒手感知土壤硬度。采集部分土壤剔除肉眼可见的杂质（如植物残体等），分别测定以下指标：称取 10g 新鲜土壤，利用 $CaCl_2$ 浸提法提取土壤中硝态氮（NO_3^--N）和铵态氮（NH_4^+-N），并用流动分析仪（AutoAnalyzer 3，SEAL，Germany）测定其含量；称取 5g 风干土壤，利用钼锑抗比色法和分光光度计（上海产）测定土壤速效磷含量；称取 5g 风干土壤，利用火焰光度计（上海产）测定土壤速效钾含量。土壤水分流失量和土壤紧实度数值为整数，其余指标数值精度为小数点保留两位。

1.4　数据分析

利用 Microsoft Office Excel 2016 进行数据整理。图形绘制采用 Origin8.5 软件进行。利用 SPSS20.0 软件的单因素方差分析比较各处理对土壤理化性质的差异显著性。所有数据结果均以平均值±标准差的形式表达。

2　结果与分析

2.1　改性纤维素与生物炭配施对土壤理化性质的影响

由表 2 可见，与 CK（无任何添加物）相比，单施改性纤维素 CMC-NH_4 处理（A1 和 A2）均显著降低了土壤 pH，达 0.17～0.20 个单位；低剂量（A1）和高剂量（A2）处理均显著增加了土壤紧实度，分别增加了 13.69%和 22.90%，同时土壤较硬以及在土壤表层形成一定厚度结皮，特别是 A2 处理土壤中还存在少许较硬结块。与 CK 相比，单施改性纤维素 CMC-Na 处理（B1 和 B2）均显著增加了土壤 pH、土壤紧实度以及在土壤表层形成一定厚度结皮，其中低剂量（B1）和高剂量（B2）处理土壤 pH 分别比 CK 增加了 0.32 和 0.43 个单位；B1 和 B2 处理土壤紧实度分别增加了 99.66%和 113.58%，同时两个处理土壤坚硬并形成了小结块。与 CK 相比，单施改性纤维素 CMC-K 处理（C1 和 C2）均增加了土壤 pH，其中高剂量（C2）处理增幅最大，达 0.20 个单位；C1 和 C2 处理的土壤紧实度并未显著变化；土壤仅在表层较硬，同时在表层形成一定厚度结皮，整体土壤较为松软，并无明显结块。与 CK 相比，单施生物炭处理（D1）仅显著增加了土壤 pH，达 0.42 个单位，而对土壤紧实度、土壤结块性、土壤表层厚度无影响。施加不同剂量改性纤维素 CMC-NH_4 加入同比例（0.5%）的生物炭（A1D1 和 A2D1）后，仅高剂量配施生物炭（A2D1）处理土壤 pH 和土壤紧实度显著高于 CK，分别增加了 0.15 个单位和 8.42%；但与单施改性纤维素 CMC-NH_4 相比，改性纤维素 CMC-NH_4 与生物炭配施对土壤理化性质影响较大，与 A1 相比，A1D1 显著增加了土壤 pH，达 0.27 个单位，A1D1 处理显著降低了土壤紧实度和土壤表层结皮厚度，分别降低了 8.88%和 60.59%；与 A2 相比，A2D1 显著增加了土壤 pH，达 0.32 个单位，A2D1 处理显著降低了土壤紧实度和土壤表层结皮厚度，分别降低了 11.78%和 52.55%。与 CK 相比，施加不同剂量改性纤维素 CMC-Na 加入同比例（0.5%）的生物炭（B1D1 和 B2D1）处理均显著增加了土壤 pH，

表 2　实验结束时（第 20 天）各处理土壤理化性质

Table 2　Soil physicochemical properties of each treatment at the end of the experiment (the 20th day)

处理 Treatment	施加材料 Applied material	pH	土壤紧实度 Soil compaction (kPa)	硬度与土壤成块性 Hardness and fragmentation	表层结皮厚度 Surface crust thickness(mm)
CK	无添加 None	8.09±0.13f	891±22h	土壤松软,未结块 The soil is soft and no caked	0g
A1	CMC-NH_4	7.89±0.09g	1013±12f	土壤较硬,未结块 The soil is hard and no caked	1.70±0.20b
A2	CMC-NH_4	7.92±0.10g	1095±30e	土壤较硬,少许板结 The soil is a little hard and slightly caked	1.96±0.15a
B1	CMC-Na	8.41±0.06abc	1779±73b	土壤坚硬,形成小结块 The soil is hard and slightly caked	1.63±0.06bc
B2	CMC-Na	8.52±0.04a	1903±34a	土壤坚硬,形成小结块 The soil is hard and slightly caked	1.67±0.06bc
C1	CMC-K	8.17±0.04ef	879±14h	表层较硬,下层松软 The top layer of soil is hard and the bottom layer is soft	1.47±0.15c
C2	CMC-K	8.29±0.04cd	905±10h	表层较硬,下层松软 The top layer of soil is hard and the bottom layer is soft	1.77±0.15ab
D1	BC	8.53±0.06a	884±10h	土壤松软,未结块 The soil is soft and no caked	0g
A1D1	CMC-NH_4+BC	8.16±0.09ef	923±9gh	表层较硬,下层松软 The top layer of soil is hard and the bottom layer is soft	0.67±0.15f
A2D1	CMC-NH_4+BC	8.24±0.07de	966±8fg	表层较硬,少许结块 The top layer of soil is hard and slightly caked	0.93±0.21e
B1D1	CMC-Na+BC	8.48±0.06ab	1513±82d	土壤较硬,有小结块 The soil is a little hard and slightly caked	1.00±0.10de
B2D1	CMC-Na+BC	8.48±0.10ab	1632±49c	土壤较硬,有小结块 The soil is a little hard and slightly caked	1.17±0.06d
C1D1	CMC-K+BC	8.34±0.07cd	891±16h	表层较硬,下层松软 The top layer of soil is hard and the bottom layer is soft	0.83±0.06ef
C2D1	CMC-K+BC	8.38±0.06bc	913±13gh	表层较硬,下层松软 The top layer of soil is hard and the bottom layer is soft	0.97±0.05de

注：图表中数据均为平均值±均方差。小写字母表示处理间在 0.05 水平上的差异显著性。下同。

Note：There are mean±SD in all table and figure. Lowercase indicates the difference significance among treatments at 0.05 level. The same as below.

均为 0.39 个单位，同时 2 个处理也显著增加了土壤紧实度，达 69.81%～83.16%，并在土壤表层形成一定厚度结皮；但与 B1 相比，B1D1 的土壤紧实度和土壤表层结皮厚度显著降低，分别降低了 14.95%和 38.65%；与 B2 相比，B2D1 的土壤紧实度和土壤表层结皮厚度也显著降低，分别降低了 14.24%和 29.94%。与 CK 相比，施加不同剂量改性纤维素 CMC-K 加入同比例（0.5%）的生物炭（C1D1 和 C2D1）处理均显著增加了土壤 pH，达 0.25～0.29 个单位，并在表层形成一定厚度结皮；与 C1 相比，C1D1 可以显著降低土壤表层结皮，达 43.54%；与 C2 相比，C2D1 也可以显著降低土壤表层结皮，达 45.20%。

综上，单施 3 种改性纤维素和单施生物炭均不同程度改变了土壤 pH、土壤紧实度、土壤成块性以及土壤表层结皮，而 3 种改性纤维素与生物炭配施有降低土壤紧实度、土壤表层结皮厚度和土壤成块性的趋势。

2.2　改性纤维素与生物炭配施对土壤养分含量的影响

由表 3 可见，与 CK（无任何添加物）相比，单施改性纤维素的 CMC-NH_4 处理（A1 和 A2）均增加了土壤铵态氮、硝态氮以及速效磷、速效钾含量，其中高剂量（A2）处理土壤铵态氮增幅最大，比 CK 增加了 275.84%，低剂量（A1）处理与 CK 差异不显

表 3　实验结束时（第 20 天）各处理土壤养分含量（$mg \cdot kg^{-1}$）

Table 3　Soil nutrient content of each treatment at the end of the experiment (the 20th day) ($mg \cdot kg^{-1}$)

处理 Treatment	施加材料 Applied material	铵态氮 NH_4^+-N	硝态氮 NO_3^--N	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
CK	无添加 None	1.49±0.18cde	29.65±0.87g	12.04±1.06e	150.12±6.21g
A1	CMC-NH_4	1.79±0.18c	32.32±0.95fg	14.56±0.99d	170.36±4.32ef
A2	CMC-NH_4	5.60±0.86a	43.55±2.22a	14.20±0.48d	167.29±10.87ef
B1	CMC-Na	1.27±0.20def	41.02±2.48ab	19.56±1.79a	159.89±7.16f
B2	CMC-Na	1.15±0.07efg	37.68±2.65cd	17.54±1.90b	167.67±5.26ef
C1	CMC-K	0.73±0.05hi	43.78±3.21a	18.88±1.52ab	231.41±6.01d
C2	CMC-K	0.70±0.03i	35.52±2.85de	15.67±0.62cd	283.37±6.33b
D1	BC	1.31±0.06de	33.50±0.73ef	15.51±0.89cd	161.78±4.69ef
A1D1	CMC-NH_4+BC	1.67±0.09cd	36.41±0.76de	15.08±0.74d	165.19±7.12ef
A2D1	CMC-NH_4+BC	2.22±0.10b	37.38±0.77cd	14.67±0.52d	170.29±5.07ef
B1D1	CMC-Na+BC	1.34±0.08de	37.70±2.13cd	19.77±1.04a	161.91±6.22ef
B2D1	CMC-Na+BC	1.14±0.08efgh	36.93±1.45cd	18.82±0.62ab	172.30±3.68e
C1D1	CMC-K+BC	0.87±0.04fghi	39.99±1.03bc	18.60±1.01ab	242.36±6.32c
C2D1	CMC-K+BC	0.81±0.04ghi	37.11±0.61cd	17.33±0.89bc	293.82±5.00a

著；同样地，A2 处理土壤硝态氮含量比 CK 高 46.88%，A1 处理与 CK 差异不显著；A1 与 A2 处理的速效磷和速效钾含量均显著高于 CK，其速效磷和速效钾含量分别比 CK 增加了 17.94%～20.93%和 11.44%～13.48%。单施改性纤维素 CMC-Na 处理（B1 和 B2）均显著增加了土壤硝态氮、速效磷以及速效钾含量，而对土壤铵态氮含量无显著影响，其中低剂量（B1）和高剂量（B2）处理土壤硝态氮、速效磷、速效钾含量分别比 CK 增加了 38.35%和 27.08%、62.46%和 45.68%、6.51%和 11.69%；B1 与 B2 处理间各土壤养分指标含量均无显著差异。单施改性纤维素的 CMC-K 处理（C1 和 C2）均显著降低了土壤铵态氮含量，同时显著增加了土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量，其中低剂量（C1）和高剂量（C2）处理土壤铵态氮含量分别比 CK 降低了 51.01%和 53.02%；C1 和 C2 土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量分别比 CK 增加了 47.66%和 19.80%、56.81%和 30.15%、54.15%和 88.76%；且 C1 和 C2 处理间各土壤养分指标均存在显著差异。单施生物炭处理（D1）中，除土壤铵态氮含量外，土壤硝态氮、速效磷、速效钾含量均显著高于 CK，分别增加了 19.73%、28.82%和 7.76%。施加不同剂量改性纤维素 CMC-NH_4 加入同比例（0.5%）的生物炭（A1D1 和 A2D1）后，2 个处理的土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量显著高于 CK，分别增加了 22.80%～26.07%、21.84%～25.25%和 10.04%～13.44%，而仅 A2D1 的土壤铵态氮显著高于 CK，增加了 48.99%；但与单施改性纤维素的 CMC-NH_4 相比，改性纤维素 CMC-NH_4 与生物炭配施对土壤养分也有一定影响，与 A1 相比，低剂量（A1D1）处理显著增加了土壤硝态氮含量，达 12.65%；与 A2 相比，高剂量（A2D1）处理土壤铵态氮和硝态氮含量显著降低，分别降低了 60.36%和 14.17%。施加不同剂量改性纤维素 CMC-Na 加入同比例（0.5%）的生物炭（B1D1 和 B2D1）后，2 个处理均显著增加了土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量，分别增加了 24.55%～27.15%、56.31%～64.20%和 7.85%～14.77%，而对土壤铵态氮含量无显著性影响；但与单施改性纤维素 CMC-Na 相比，改性纤维素 CMC-Na 与生物炭配施对土壤养分影响不明显，仅低剂量（B1D1）处理土壤硝态氮显著低于 B1，比 B1 降低了 8.09%。与 CK 相比，施加不同剂量改性纤维素 CMC-K 加入同比例（0.5%）的生物炭（C1D1 和 C2D1）处理显著降低了土壤铵态氮含量，达 41.61%～45.64%；C1D1 和 C2D1 显著增加了土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量，分别比 CK 增加了 25.16%～34.87%、43.94%～54.49%和 61.44%～95.72%；与单施改性纤维素 CMC-K 处理相比，改性纤维素 CMC-K 与生物炭配施可以显著增加土壤速效钾含量，C1D1 土壤速效钾比 C1 增加了 4.73%，C2D1 土壤速效钾比 C2 增加了 3.69%。综上，

单施 3 种改性纤维素和单施生物炭均不同程度地改变了土壤养分含量，与之相比，改性纤维素 CMC-NH_4 与生物炭配施有降低土壤铵态氮和硝态氮含量的作用；而改性纤维素 CMC-K 与生物炭配施有增加土壤速效钾的作用。

2.3　改性纤维素与生物炭配施对土壤水分流失量的影响

由图 1a 可见，与 CK（无任何添加物）相比，单施改性纤维素 CMC-NH_4 处理（A1 和 A2）在第 4 和第 6 天时，土壤水分流失量降低，而后 2 个处理的土壤水分流失量始终高于 CK，尤其是在第 12 天时差异显著；由表 4 可以得知，单施改性纤维素 CMC-NH_4 有增加累计土壤水分流失量的趋势，特别是低剂量（A1）处理累计土壤水分流失量增加显著，比 CK 增加了 10.13%。单施改性纤维素 CMC-Na 处理（B1 和 B2）在第 4、6 和 8 天时，土壤水分流失量均低于 CK 处理，而后 2 个处理土壤水分流失量均始终高于 CK 处理（图 1a）；但 2 个处理并不能显著影响累计土壤水分流失量（表 4）。与单施改性纤维素 CMC-Na 处理类似，单施改性纤维素 CMC-K 处理（C1 和 C2）的土壤水分流失量也仅在第 4、6 和 8 天时低于 CK 处理，而后 2 个处理土壤水分流失量均始终高于 CK 处理（图 1a）；2 个处理并不能显著影响累计土壤水分流失量（表 4）。单施生物炭处理（D1）对土壤水分流失量的影响并不明显，其变化曲线与 CK 处理基本一致。由图 1b 可见，施加不同剂量改性纤维素 CMC-NH_4 加入同比例（0.5%）的生物炭（A1D1 和 A2D1）后，低剂量（A1D1）处理仅在实验第 12、20 天时土壤水分流失量高于 CK 处理，而高剂量（A2D1）处理仅在实验第 12 天时土壤水分流失量高于 CK 处理；由表 4 可知，与 CK 相比，改性纤维素 CMC-NH_4 与生物炭配施可以降低累计土壤水分流失量，特别是 A2D1 处理最为显著，其减少累计土壤水分流失量达 8.86%。施加不同剂量改性纤维素 CMC-Na 加入同比例（0.5%）的生物炭（B1D1 和 B2D1）后，低剂量（B1D1）处理仅在实验第 12、20 天时土壤水分流失量略高于 CK 处理，而高剂量（B2D1）处理仅在实验第 8、20 天时土壤水分流失量略高于 CK 处理（图 1B）；从表 4 可以得知，改性纤维素 CMC-Na 与生物炭配施可以显著降低累计土壤水分流失量，B1D1 和 B2D1 处理均可以减少累计土壤水分流失量，均达 6.33%。施加不同剂量改性纤维素 CMC-K 加入同比例（0.5%）的生物炭（C1D1 和 C2D1）后，低剂量（C1D1）处理仅在实验第 12、20 天时土壤水分流失量高于 CK 处理，而高剂量

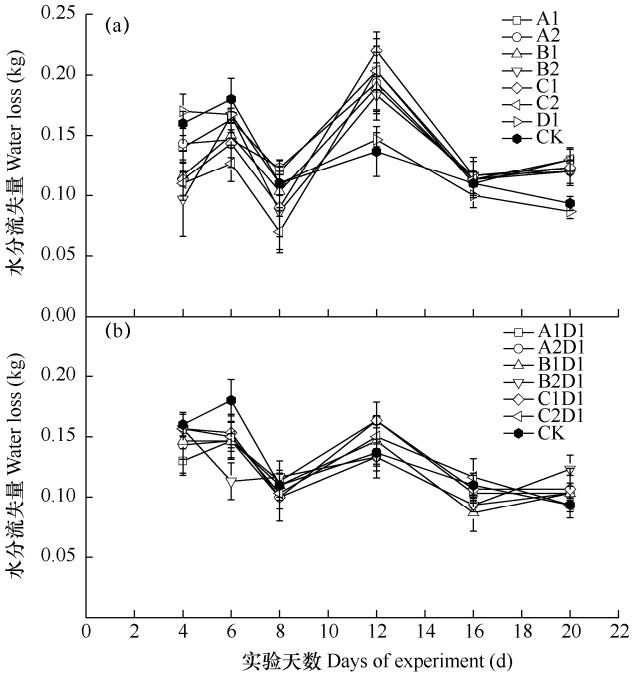

图 1　各处理土壤水分流失量的变化

Fig. 1　Changes in soil water loss under different treatments

表 4　各处理累计土壤水分流失量

Table 4　Cumulative soil water loss of each treatment

处理 Treatment	施加材料 Applied material	水分流失量 Water loss(kg)	处理 Treatment	施加材料 Applied material	水分流失量 Water loss(kg)
CK	无添加 None	0.79±0.03bc	D1	BC	0.78±0.03cd
A1	CMC-NH_4	0.87±0.04a	A1D1	CMC-NH_4+BC	0.76±0.03cde
A2	CMC-NH_4	0.84±0.07ab	A2D1	CMC-NH_4+BC	0.72±0.02e
B1	CMC-Na	0.80±0.03bc	B1D1	CMC-Na+BC	0.74±0.02de
B2	CMC-Na	0.77±0.03cde	B2D1	CMC-Na+BC	0.74±0.03de
C1	CMC-K	0.81±0.03bc	C1D1	CMC-K+BC	0.79±0.01cd
C2	CMC-K	0.77±0.01cde	C2D1	CMC-K+BC	0.77±0.01cde

（C2D1）处理仅在实验第 12、16 天时土壤水分流失量高于 CK 处理（图 1b）；但改性纤维素 CMC-K 与生物炭配施并不能显著影响累计土壤水分流失量（表 4）。综上，单施改性纤维素 CMC-NH_4 会增加累计土壤水分流失量，而改性纤维素 CMC-NH_4 与生物炭配施则可以降低累计土壤水分流失量；单施改性纤维素 CMC-Na 对累计土壤水分流失量无显著性影响，而改性纤维素 CMC-Na 与生物炭配施则可以显著降低累计土壤水分流失量；无论与生物炭配施与否，改性纤维素 CMC-K 对累计土壤水分流失量均无显著影响。

2.4　改性纤维素与生物炭配施对旱稻萌发的影响

由图 2a 可见，与 CK（无任何添加物）相比，单施低剂量改性纤维素 CMC-NH_4（A1）处理旱稻苗高始终高于 CK 处理，而单施高剂量改性纤维素 CMC-NH_4（A2）处理在第 16 天开始，旱稻苗高就低于 CK 处理了；由图 3 可知，A1 处理显著增加了旱稻地上部生物量，比 CK 增加了 203.88%，而 A2 处理显著降低了旱稻地上部生物量。单施低剂量改性纤维素 CMC-Na（B1）处理旱稻苗高始终高于 CK 处理，而单施高剂量改性纤维素 CMC-Na（B2）处理在第 16 天开始，旱稻苗高才高于 CK 处理（图 2a）；由图 3 可知，与 CK 相比，B1 处理显著增加了旱稻地上部生物量，达 133.49%，而 B2 处理显著降低了旱稻地上部生物量。单施改性纤维素 CMC-K（C1 和 C2）处理旱稻苗高始终高于 CK 处理（图 2a）；由图 3 可知，与 CK 相比，低剂量（C1）和高剂量（C2）处理均显著增加了旱稻地上部生物量，分别达 111.16%和 71.84%。由图 2a 可见，单施生物炭处理（D1）在第 6 天开始旱稻苗高始终高于 CK 处理；与 CK 相比，D1 处理也显著增加了旱稻地上部生物量，达 18.93%（图 3）。由图 2b 可见，施加不同剂量改性纤维素 CMC-NH_4 加入同比例（0.5%）的生物炭（A1D1 和 A2D1）后，旱稻苗高始终高于 CK 处理；由图 3 可见，低剂量（A1D1）和高剂量（A2D1）处理均显著增加旱稻地上部生物量，分别比 CK 增加了 225.24%和 147.57%；与单施改性纤维素 CMC-NH_4 处理相比，改性纤维素 CMC-NH_4 与生物炭配施均可显著增加旱稻地上部生物量，A1D1 地上部生物量比 A1 增加了 7.03%，A2D1 地上部生物量比 A2 增加了 295.36%。施加不同剂量改性纤维素 CMC-Na 加入同比例（0.5%）的生物炭（B1D1 和 B2D1）后，2 个处理的旱稻苗高均从第 6 天开始明显高于 CK 处理（图 2b）；由图 3 可见，低剂量（B1D1）和高剂量（B2D1）处理均显著增加旱稻地上部生物量，分别比 CK 增加了 143.20%和 138.83%；与 B2 相比，B2D1 地上部生物量增加了 241.67%。施加不同剂量改性纤维素 CMC-K 加入同比例（0.5%）的生物炭（C1D1 和 C2D1）后，旱稻苗高始终高于 CK 处理（图 2b）；由图 3 可见，低剂量（C1D1）和高剂量（C2D1）处理均显著增加旱稻地上部生物量，分别比 CK 增加了 125.73%和 119.90%；与 C2 相比，C2D1 地上部生物量增加了 27.97%。综上，单施 3 种低剂量改性纤维素、单施高剂量改性纤维素 CMC-K 和单施生物炭均不同程度地增加了旱稻苗高和地上部生物量，但单施高剂量改性纤维素 CMC-NH_4 和 CMC-Na 均抑制了旱稻生长同时降低了地上部生物量；当 3 种高剂量改性纤维素与生物炭配施时则可以促进旱稻萌发和增加地上部生物量，这种正向效益在低剂量改性纤维素与生物炭配施时并不明显，仅 A1D1 处理地上部生物量显著高于 A1 处理，而 B1D1 与 B1 处理之间、C1D1 与 C1 处理均无显著性差异（图 3）。

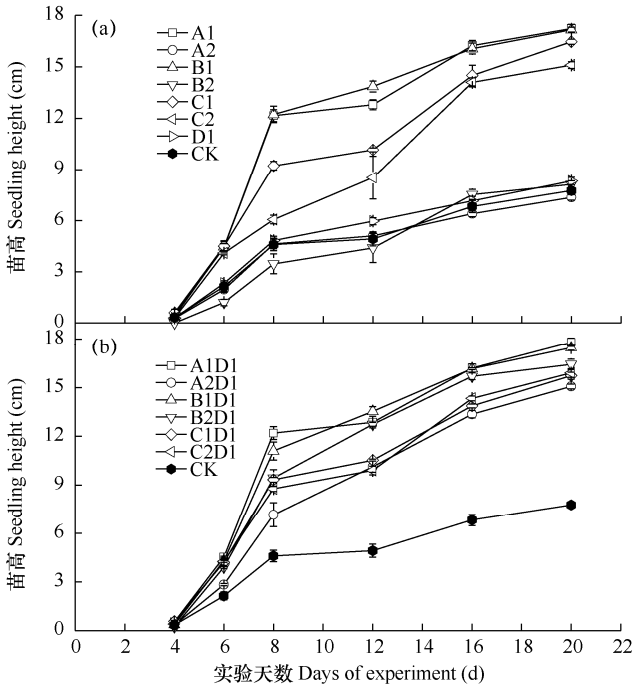

图 2　各处理旱稻苗高的变化

Fig. 2　Changes in seedling height of upland rice under different treatments

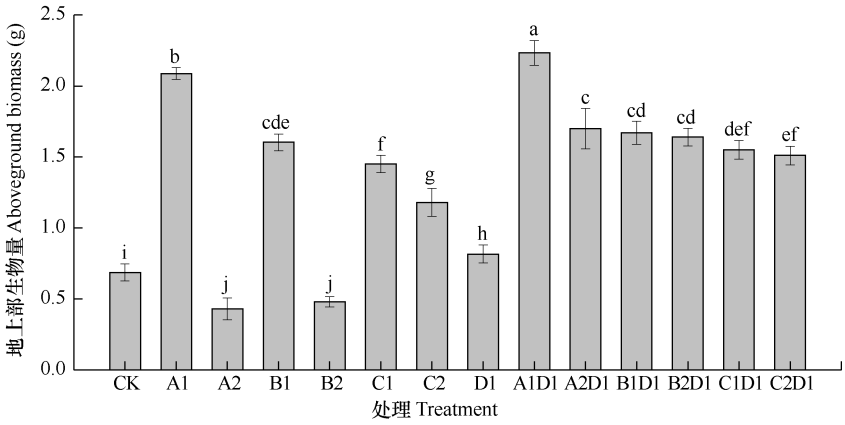

图 3　实验结束时（第 20 天）各处理地上部生物量

Fig. 3　Aboveground biomass of each treatment at the end of the experiment (the 20th day)

3　结论与讨论

3.1　讨论

3.1.1　改性纤维素与生物炭配施对土壤理化性质的影响

3 种改性纤维素和生物炭及其配施均改变了土壤 pH 值，这主要是受其自身材料性质的影响。施加呈酸性的改性纤维素 CMC-NH_4 能降低土壤 pH 值，而施加呈碱性的改性纤维素 CMC-Na 和 CMC-K 和生物炭均能在不同程度上增加土壤 pH 值，这与前人研究结果一致[15]。与单施改性纤维素 CMC-NH_4 和 CMC-K 处理相比，二者与生物炭配施时均增加了土壤 pH 值，推测是因为生物炭 pH 较 CMC-NH_4 和 CMC-K 高且生物炭添加量较多导致；而与单施改性纤维素 CMC-Na 处理相比，CMC-Na 与生物炭配施对土壤 pH 值影响不大，这与二者 pH 值接近有关。单施 3 种改性纤维素均不同程度地提高了土壤紧实度、土壤成块性以及土壤表层结皮，而与生物炭配施后可以减缓改性纤维素引起的土壤紧实度增加和土壤板结的影响。先前有研究表明施加土壤保水剂能够使土壤体积增大、总孔隙度增加，而本研究发现改性纤维素 CMC-Na 和 CMC-NH_4 由于具有极强的极性进而可以显著增加土壤紧实度和土壤成块性（或导致土壤板结）；而 CMC-K 极性较弱，仅在土壤表层形成了较薄结皮，这与杨世琦等[16]研究结果一致。改性纤维素 CMC-NH_4 和 CMC-Na 与生物炭配施均可显著降低土壤紧实度、土壤表层结皮厚度以及减少土壤成块，其原因除了生物炭密度低具有一定稀释作用外[17]，还可能与生物炭占据了土壤较大孔径中的非毛管孔隙以及增加土壤团聚性有关[18]，进而减弱改性纤维素极性所带来的影响。

3.1.2　改性纤维素与生物炭配施对土壤养分的影响

改性纤维素可以减少养分流失并提高养分利用效率。在本研究中，单施改性纤维素 CMC-NH_4 可以增加土壤铵态氮和硝态氮含量，这主要是因为 CMC-NH_4 本身含有氮素并可以释放到土壤为植物所用；同样的，单施改性纤维素 CMC-K 本身含有钾素也极大提高了土壤速效钾含量。单施改性纤维素 CMC-Na 和 CMC-K 则在不同程度上降低了土壤铵态氮含量，这表明土壤养分得到利用并被作物所吸收，最终体现在旱稻地上部生物量上[19−21]。单施 3 种改性纤维素也不同程度地提高了土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量，这是因为改性纤维素在吸附土壤水分的同时，也能够对土壤溶液中的养分离子产生一定的吸附作用[22−23]。很多研究表明生物炭可以明显改善土壤养分情况，一是生物炭可以通过提高硝化细菌活性以及改善土壤通气状况，为好氧型硝化细菌快速繁殖提供了良好的条件[24]；二是生物炭比表面积大，具有良好的吸附性，可以减少土壤养分浸出，有利于土壤养分储存[25]；三是生物炭含有一定量的可溶性有机碳，这为细菌提供相应的基质[26]，致使土壤中养分含量明显增加。与单施改性纤维素处理相比，改性纤维素 CMC-NH_4 和 CMC-Na 与生物炭配施有降低土壤无机态氮含量的趋势，推测是因为生物炭可以相对改善土壤结构，增加了土壤微生物活性进而加强了对肥料养分的利用[27]，由此也可以看出改性纤维素与生物炭配施既可以弥补改性纤维素极性过强的缺点，又可以增强和更大限度发挥生物炭对旱地土壤改良的效果。此外，改性纤维素 CMC-K 与生物炭配施有增加土壤速效钾的趋势，这主要与生

物炭自身携带相关养分有关[28]。本实验进行时间仅限于旱稻苗期，单施改性纤维素和生物炭及二者配施处理的土壤养分差异不稳定，仍需后续进行监测以探究改性纤维素与生物炭配施对土壤养分的长期效应。

3.1.3 改性纤维素与生物炭配施对土壤水分的影响

先前研究发现改性纤维素由于其可以吸水膨胀形成水凝胶，进而提高土壤含水量[29−30]。本研究发现单施 3 种改性纤维素处理在实验前期可以减少土壤水分流失量，而在实验后期增加了土壤水分流失量，这与邢磊等[15]研究结果一致。改性纤维素在土壤中存在吸附水分和释放水分两个同时进行的过程，在实验前期改性纤维素在土壤中水分吸附过程更强，而在实验后期改性纤维素水分释放过程更强[31]。同时，由于 3 种改性纤维素取代度和黏度不同，在加入土壤后对水分的吸附和释放过程的影响不同，这也是 3 种改性纤维素对土壤水分流失的抑制作用效果不同的原因。此外，改性纤维素处理在实验后期土壤表面均形成了结皮导致浇水后大多数水分不能进入土壤而蒸发流失，这也是单施改性纤维素处理在实验后期水分流失增大的原因之一。而改性纤维素与生物炭配施处理均可以在一定程度上减少累计土壤水分流失，一方面改性纤维素与生物炭配施可以改善土壤结构，增加土壤孔隙度，促进土壤水分的存储[32]；另一方面改性纤维素与生物炭配施可能促进了土壤大团聚体的形成，生物炭疏松多孔的特性更有利于改性纤维素中水分的维持。与单施 3 种改性纤维素相比，3 种改性纤维素与生物炭配施对土壤水分流失量的影响并不同，主要差异在实验后期。改性纤维素 CMC-NH_4 和 CMC-Na 与生物炭配施可以显著减少累计土壤水分流失，而改性纤维素 CMC-K 与生物炭配施并无显著差异，这可能是因为与单施改性纤维素 CMC-NH_4 和 CMC-Na 相比，二者与生物炭配施均可以显著降低土壤表层结皮厚度和土壤紧实度，实验后期浇水进入土壤的水分增加更多，而改性纤维素 CMC—K 由于自身极性较弱，其与生物炭配施后土壤硬度、土壤紧实度等未发生明显变化，实验后期浇水进入土壤的水分差异也不大。

3.1.4 改性纤维素与生物炭配施对旱稻萌发的影响

单施低浓度的改性纤维素处理均能显著增加旱稻株高和地上部生物量，这与先前研究结果一致[33]，这是因为改性纤维素能吸附水分和养分并缓慢供应给植物生长所需[34]。除改性纤维素 CMC-K 外，单施高浓度的改性纤维素 CMC-NH_4 和 CMC-Na 处理均对旱稻萌发产生了抑制作用，这可能是因为 2 种改性纤维素极性过强，其黏性过高进而导致土壤板结，土壤通气性下降抑制了旱稻萌发[35−36]；也可能与 2 种改性纤维素吸水性太强有关，争夺土壤水分资源导致旱稻萌发受限[37]。而单施高浓度的 CMC-K 处理由于其黏性相对较低，不仅没有抑制旱稻萌发，反而有一定促进效果。生物炭对旱稻萌发也具有促进作用，这与生物炭可以提高作物吸氮能力和改善土壤肥力以及减缓肥料养分释放有关[38]。与单施 3 种改性纤维素相比，其与生物炭配施处理均可以在一定程度上促进旱稻萌发，这可能是因为生物炭的多孔结构可以在一定程度上缓解改性纤维素极性过强所带来的影响[39]。从实验结果也可以看出，改性纤维素与生物炭配施处理土壤板结程度较弱，表层土壤结皮较小。同时，水分是影响旱稻萌发的关键因素，大量研究表明适量生物炭与保水剂联合施用能够有效保持土壤水分，提高作物对水分的吸收利用。本实验中，3 种高剂量改性纤维素与生物炭配施均可以显著改善土壤结构，降低土壤板结情况，减少了土壤水分和养分流失，进而有效增加植物对水分和养分的吸收利用，通过高剂量改性纤维素与生物炭配施处理地上部生物量显著增加可以证实这一点。但是，由于本实验进行时间较短且为室内盆栽实验，改性纤维素与生物炭配施对旱稻的长期影响效果和机制有待于进一步研究，未来可以进行田间实验，通过综合分析土壤水分、土壤结构、土壤养分、土壤微生物、作物生长等来深入揭示改性纤维素与生物炭配施对土壤改良的影响及其机制。

3.2 结论

单施 3 种低剂量改性纤维素可以通过提高土壤养分和水分以促进旱稻苗期生长；单施 3 种高剂量改性纤维素效果相对不佳，甚至会限制作物生长发育；生物炭也可以在一定程度上通过改善土壤理化性质来促进旱稻发育；改性纤维素与生物炭配施可以明显缓解单施改性纤维素时土壤板结和土壤紧实度过高的问题，也更大限度地发挥了土壤对生物炭施加的响应效果，进而增加土壤养分含量和旱稻地上部生物量。综合土壤结构、养分、水分和旱稻生物量来看，低剂量改性纤维素与生物炭配施可以更有效地减轻化肥对生态环境和资源可持续利用的威

胁，为节水农业发展和提高作物水分养分利用率提供了新的参考。

参考文献 References

[1] Chiang F,Mazdiyasni O,Aghakouchak A.Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity[J].Nat. Commun.,2021,12(1):1-10.

[2] 李翔翔,居辉,严昌荣,等.1961-2013 年黄淮海平原降蒸差的时空变化特征[J].中国农业气象,2015,36(3):254-262.
Li X X,Ju H,Yan C R,et al.Spatio temporal variability of water deficit in Huang-Huai-Hai plain during 1961-2013 [J].Chinese Journal of Agrometeorology,2015,36(3):254-262.(in Chinese)

[3] Purakayastha T J,Bera T,Bhaduri D,et al.A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields:pathways to climate change mitigation and global food security[J]. Chemosphere,2019,227(7):345-365.

[4] Iftime M M,Ailiesei G L,Ungureanu E,et al.Designing chitosan based eco-friendly multifunctional soil conditioner systems with urea controlled release and water retention [J].Carbohydrate polymers,2019,223:115040.

[5] He D,Cui J,Gao M,et al.Effects of soil amendments applied on cadmium availability,soil enzyme activity,and plant uptake in contaminated purple soil[J].Science of the Total Environment,2019,654:1364-1371.

[6] Palansooriya K N,Shaheen S M,Chen S S,et al.Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils:a critical review[J]. Environment international,2020,134:105046.

[7] Zheng M,Huang Z,Ji H,et al.Simultaneous control of soil erosion and arsenic leaching at disturbed land using polyacrylamide modified magnetite nanoparticles[J].Science of the Total Environment,2020,702:134997.

[8] Niyungeko C,Liang X,Shan S,et al.Synergistic effects of anionic polyacrylamide and gypsum to control phosphorus losses from biogas slurry applied soils[J].Chemosphere, 2019,234:953-961.

[9] 王惟帅,杨正礼,张爱平,等.玉米秸秆基纤维素保水缓释肥制备及应用[J].农业工程学报,2020,36(2): 236-244.
Wang W S,Yang Z L,Zhang A P,et al.Preparation and application of corn straw cellulose-based fertilizer with integration of water-retaining and slow-release[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(2):236-244.(in Chinese)

[10] 杨世琦,邢磊,刘宏元,等.羧甲基纤维素铵对黄土高原新造耕地土壤性质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(5):74-80.
Yang S Q,Xing L,Liu H Y,et al.Effects of applying ammonium carboxymethyl cellulose on soil properties of new cultivated farmland in Loess Plateau[J].J. Northwest A & F Univ.(Nat. Sci.),2021,49(5):74-80.(in Chinese)

[11] 刘宏元,周志花,赵光昕,等.改性纤维素对旱稻萌发和旱地土壤性质的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(5): 168-175.
Liu H Y,Zhou Z H,Zhao G X,et al.Effects of modified cellulose on upland rice germination and soil properties[J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2023, 25(5):168-175.(in Chinese)

[12] 惠锦卓,张爱平,刘汝亮,等.添加生物炭对灌淤土土壤养分含量和氮素淋失的影响[J].中国农业气象,2014,35(2): 156-161.
Hui J Z,Zhang A P,Liu R L,et al.Effects of biochar on soil nutrients and nitrogen leaching in anthropogenic-alluvial soil[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(2): 156-161.(in Chinese)

[13] Liu H Y,Li H B,Zhang A P,et al.Inhibited effect of biochar application on N_2O emissions is amount and time-dependent by regulating denitrification in a wheat-maize rotation system in North China[J].Science of the Total Environment,2020,721:137636.

[14] 高悦,张爱平,杜章留,等.优化施氮条件下添加生物炭对宁夏灌区土壤条件和水稻生长的影响[J].中国农业气象,2019,40(5):327-336.
Gao Y,Zhang A P,Du Z L,et al.Effects of biochar on soil conditions and rice growth in Ningxia irrigated area under optimized nitrogen application conditions[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2019,40(5):327-336. (in Chinese)

[15] 邢磊,杨世琦.改性纤维素对盆栽小麦生长及土壤水分和养分的影响[J].西北农业学报,2019,28(4):536-545.
Xing L,Yang S Q.Effects of modified cellulose on growth of potted wheat and soil moisture and nutrients[J].Acta. Agric. Boreali-Occident. Sin.,2019,28(4):536-545.(in Chinese)

[16] 杨世琦,邢磊,刘宏元,等.羧甲基纤维素钠对黄土高原新

造耕地土壤改良效果[J].中国农业大学学报,2021,26(4):185-191.
Yang S Q,Xing L,Liu H Y,et al.Effects of sodium carboxymethyl cellulose application on soil properties of new cultivating farmland in Loess Plateau[J].J. China Agric. Univ.,2021,26(4):185-191.(in Chinese)

[17] 刘慧屿,娄春荣,韩英祚,等.秸秆生物炭与减量氮肥配施对玉米氮素利用率及土壤结构的影响[J].土壤通报,2020,51(5):1180-1188.
Liu H Y,Lou C R,Han Y Z,et al.Effects of combined application of straw biochar and reduced nitrogen fertilizer on nitrogen utilization rate and soil structure of maize[J]. Chinese Journal of Soil Science,2020,51(5):1180-1188.(in Chinese)

[18] Ibrahim A,Marie H A M E,Elfaki J.Impact of biochar and compost on aggregate stability in loamy sand soil[J].Agricultural Research Journal,2021,58(1):34-44.

[19] Kanmani P,Aravind J,Kamaraj M,et al.Environmental applications of chitosan and cellulosic biopolymers: a comprehensive outlook[J].Bioresource Technol.,2017,295-303.

[20] Omer A M,Elgarhy G S,El-Sub R Uiti G M,et al.Fabrication of novel iminodiacetic acid-functionalized carboxymethyl cellulose microbeads for efficient removal of cationic crystal violet dye from aqueous solutions[J].Int. J. Biol. Macromol.,2020,148:1072-1083.

[21] 王永杰,颜鑫,王英,等.喷施羧甲基纤维素钾对宁夏引黄灌区土壤及其作物的影响[J].中国农业大学学报,2022,27(6):215-224.
Wang Y J,Yan X,Wang Y,et al.Effects of potassium carboxymethyl cellulose spraying on soil and crops in irrigated area of Yellow River Diversion in Ningxia[J]. Journal of China Agricultural University,2022,27(6):215-224.(in Chinese)

[22] Lu S,Liu W,Wang Y,et al.An adsorbent based on humic acid and carboxymethyl cellulose for efficient dye removal from aqueous solution[J].Int. J. Biol. MacromoL.,2019,134:790-797.

[23] Ugawa S,Inagaki Y,Karibu F,et al.Effects of soil compaction by a forestry machine and slash dispersal on soil N mineralization in *Cryptomeria japonica* plantations under high precipitation[J].New Forest,2020,51(5):1-21.

[24] Liu Y X,Lyu H H,Shi Y,et al.Effects of biochar on soil nutrients leaching and potential mechanisms:a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(1):304-310.

[25] Takaya C A,Fletcher L A,Singh S, et al.Phosphate and ammonium sorption capacity of biochar and hydrochar from different wastes[J].Chemosphere,2016,145:518-527.

[26] 赵光昕,张晴雯,刘杏认,等.农田土壤硝化反硝化作用及其对生物炭添加响应的研究进展[J].中国农业气象,2018,39(7):442-452.
Zhao G X,Zhang Q W,Liu X R,et al.Nitrification and denitrification and its response to biochar addition in agricultural soil:a review[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2018,39(7):442-452.(in Chinese)

[27] Zhao T T,Liu L,Liu X W.Effects of amendment of biochar on net carbon transformation rate of cow manure and composition of humic substances in soil[J].Acta Pedologica Sinica,2022,58(3):619-627.

[28] Ippolito J A,Cui L,Kammann C,et al.Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review[J].Biochar, 2020,2(4):421-438.

[29] 白文波,李茂松,赵虹瑞,等.保水剂对土壤积水入渗特征的影响[J].中国农业科学,2010,43(24):5055-5062.
Bai W B,Li M S,Zhao H R,et al.Effect of water retaining agent on infiltration characteristics of soil water accumulation[J].Sci. Agric. Sin.,2010,43(24):5055-5062.(in Chinese)

[30] 杨世琦,王永杰,颜鑫,等.黄土高原新造耕地施用羧甲基纤维素钾的土壤效应[J].土壤通报,2022,53(4):858-865.
Yang S Q,Wang Y J,Yan X,et al.Soil effects of potassium carboxymethyl cellulose on newly cultivated land in Loess Plateau[J].Chinese Journal of Soil Science,2022,53(4):858-865.(in Chinese)

[31] 黄志勇,赵春燕,倪佳东,等.吡啶酮改性纤维素吸附剂对金属离子的吸附性能[J].离子交换与吸附,2016,32(5):440-448.
Huang Z Y,Zhao C Y,Ni J D,et al.Metal cation adsorption properties of pyridone functionalized cellulosic adsorbent [J].Ion. Exch. Adsorpt.,2016,32(5):440-448.(in Chinese)

[32] 王湛,李银坤,王利春,等.生物炭配施有机肥对菜田土壤水分及水分利用效率的影响[J].中国农业气象,2017,38(12):771-779.
Wang Z,Li Y K,Wang L C,et al.Effects of organic fertilizer

combined with biochar on soil moisture and water use efficiency in vegetable field[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2017,38(12):771-779.(in Chinese)

[33] 杨永辉,吴普特,武继承,等.保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J].农业工程学报,2010,26(12):19-26.

Yang Y H,Wu P T,Wu J C,et al.Impacts of water-retaining agent on soil moisture and water use in different growth stages of winter wheat[J].Transactions of the CSAE,26(12):19-26.(in Chinese)

[34] 王琰,井大炜,付修勇,等.保水剂施用量对杨树苗土壤物理性状与微生物活性的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):53-58.

Wang Y,Jing D W,Fu X Y,et al.Effects of application amount of super-absorbent polymer on soil physical characteristics and microbial activity under poplar seedlings [J].Bull. Soil Water Conserv.,2017,37(3):53-58. (in Chinese)

[35] 许紫峻,韩舒,师庆东.不同保水剂对土壤物理性质影响的探究[J].节水灌溉,2016(10):10-14.

Xu Z J,Han S,Shi Q D.Effect of different super absorbent polymer on soil physical properties[J].Water Saving Irrigation, 2016(10):10-14.(in Chinese)

[36] 纪冰祎,李娜,王云跃.保水剂对土壤物理性质影响的研究进展[J].水土保持应用技术,2018(5):29-31.

Ji B Y,Li N,Wang Y Y.Research progress on effects of water retaining agents on soil physical properties[J]. Technol. Soil Water Conserv.,2018(5):29-31.(in Chinese)

[37] 邢磊.改性纤维素对黄土高原农田土壤及作物的影响研究[D].北京:中国农业科学院,2019:1-75

Xing L.Effects of modified cellulose on farmland soil and crops in Loess Plateau[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2019:1-75.(in Chinese)

[38] Jiang Y,Kang Y,Han C,et al.Biochar amendment in reductive soil disinfestation process improved remediation effect and reduced N_2O emission in a nitrate-riched degraded soil[J].Archives of Agronomy and Soil Science, 2020,66(7):983-991.

[39] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J].农业机械学报,2019,50(8):309-320.

Wei Y X,Shi G X,Feng C,et al.Effects of biochar on soil structure and soybean yield in sloping farmland in black soil area[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):309-320.(in Chinese)