

施用脱硫石膏对荒漠碱土剖面土壤有机碳分布的影响

孙丰华, 陈炳铭, 王玉刚

(中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室,
干旱区生态安全与可持续发展重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;
中国科学院阜康荒漠生态系统国家站, 新疆 阜康 831505; 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 石膏类钙源物对于盐碱土改良具有显著作用。为了探究施加钙源物对荒漠碱土土壤有机碳(SOC)的影响,设置以钙源物脱硫石膏施用量 0、10、20、30、40 t/hm² 共 5 个处理水平,对荒漠碱土 0~20 cm 土层进行改良,分析改良后 SOC 在 0~100 cm 剖面上的分布、改良土层 SOC 的变化趋势以及影响因素。结果表明:脱硫石膏施用量为 30 t/hm² 时,改良土层改碱效果最好,pH 下降为 8.24(初始值为 9.97),电导率(EC)为 0.98 mS/cm。脱硫石膏土壤改良对 SOC 的影响深度为 0~40 cm,下层 SOC 含量无明显变化($P>0.05$)。随着改良时间的增加,在 15 d 后 SOC 含量无显著变化。随着施加量的增加,当施用量为 40 t/hm² 时,改良土层 SOC 含量和土壤有机碳密度(SOCD)均减少($P<0.05$)。降水量和相对湿度对改良土层 SOC 含量减少有促进作用,作用大小:降水量>相对湿度;太阳总辐射和温度对改良土层 SOC 含量减少则有抑制作用,作用大小:太阳总辐射>温度。改良土层在获得最佳的碱性改良效果的同时,并不会造成 SOC 含量的下降。

关键词: 土壤改良; 土壤有机碳; 脱硫石膏; 盐碱土

中图分类号: TB44

文献标志码: A

引用格式:

孙丰华,陈炳铭,王玉刚. 施用脱硫石膏对荒漠碱土剖面土壤有机碳分布的影响[J]. 中国粉体技术, 2023, 29(3): 1-11.

SUN F H, CHEN B M, WANG Y G. Effects of applying desulfurized gypsum on soil organic carbon distribution in profile of desert alkaline soil[J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(3): 1-11.

Effects of applying desulfurized gypsum on soil organic carbon distribution in profile of desert alkaline soil

SUN Fenghua, CHEN Bingming, WANG Yugang

(State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;
Fukang Station of Desert Ecology, Chinese Academy of Sciences, Fukang 831505, China;
School of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Gypsum as calcium-based material is widely used to ameliorate saline-sodic soils. To evaluate the impacts of calcium-based application on soil organic carbon (SOC) in desert alkaline soil, a case study was conducted with different amounts of desulfurization gypsum application (0, 10, 20, 30 and 40 t/hm²). We estimated the distribution of SOC in the 0~100 cm profile, the variation trend and influencing factors of SOC in the 0~20 cm soil layer of desert alkaline soil in a period of 46 d experiments. The results showed that desulfurization gypsum application ameliorated the desert soil, and soil pH values decreased significantly in all treatment experiments. The pH was 8.24 (initial 9.97) in the treatment with the amount of 30 t/hm² desulfu-

收稿日期: 2022-11-24, 修回日期: 2023-02-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目 编号: U1803342。

第一作者简介: 孙丰华(1997—) 男, 硕士研究生, 研究方向为生态修复。E-mail: sunfenghua20@mailsucas.ac.cn。

通信作者简介: 王玉刚(1976—) 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 研究方向为干旱区景观与物质循环。E-mail: wangyg@msxjba.cn。

rization gypsum, and the electrical conductivity is 0.98 mS/cm. The SOC content with the desulfurization gypsum application changed at 0–40 cm soil depth, but it had no significant change at the soil depth of 40–100 cm ($P>0.05$). The SOC content was in stable state (namely no change) 15 d after in desulfurization gypsum application. The SOC content and density at the soil depth of 0–20 cm decreased in the treatment with 40 t/hm² desulfurization gypsum. Precipitation and relative humidity accelerated the decrease in SOC content at 0–20 cm depth, with the effect size of precipitation>relative humidity, but total solar radiation and temperature slowed the decrease in SOC content at 0–20 cm depth, with the effect size of total solar radiation>temperature. Overall, our findings suggest that the addition of desulfurization gypsum<40 t/hm² ameliorated saline-sodic soils but did not reduce SOC content.

Keywords: composite cement soils amelioration; soil organic carbon; desulphurized gypsum; saline-alkali soil

大气中 CO₂ 浓度不断上升而引发的全球变暖是 21 世纪人类社会面临的严峻挑战^[1], 碳排放被认为是引起全球变暖的主要原因^[2]。作为陆地生态系统最大的碳库, 土壤碳库中的细微变化会对碳循环乃至全球气候产生巨大的影响^[3]。有机碳库和无机碳库组成了土壤碳库, 有机碳库是指土壤中含碳有机物质的总和, 其储量巨大且驻留时间长, 是影响陆地碳循环中的关键因素之一^[4]。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的评估, 约 30%~50% 全球大气 CO₂ 浓度升高的贡献率来源于土壤有机碳(soil organic carbon, SOC) 损失^[5]。有机碳除了对气候变化具有重要作用外, 也是陆地生态系统生物活动重要的营养源和能量源^[6]。土壤有机碳分解和累积的变化直接影响着土壤肥力和植物生长^[7], 因此, 土壤有机碳是减缓全球变暖和提升陆地生态系统生产力至关重要的决定因子。

我国盐碱土面积约为 9.9×10^7 hm², 占全国可用耕地面积的 20% 以上^[8]。由于不合理的土地管理, 土壤盐碱化已成为制约干旱和半干旱地区农业生产的主要因素^[9]。盐碱化会导致土壤质量的退化, 通常这类土壤含盐量高, 土壤贫瘠, 生产力低下, 不仅对作物有毒害作用, 还会抑制土壤微生物的活动和作物的生长^[10]。土壤盐碱化会降低土地生产力, 因此, 土壤的改良利用是农业发展的必然过程。施用土壤改良剂是盐碱土改良方法之一, 与其他方法相比具有经济、简便等优点^[11]。迄今为止, 多种土壤改良剂如脱硫石膏^[12-13]、硫酸铝^[14]、秸秆^[15]等均取得了显著的改碱效果。石膏类钙源物是常见的土壤改良物质, 其中脱硫石膏作为钙源物的一种, 通常用于碱土的改良。脱硫石膏是一种工业废弃物, 回收利用后用于改良盐碱土, 因此脱硫石膏作为土壤改良剂在绿色、可持续发展方面有着积极的意义。脱硫石膏改良碱土的机理主要是利用石膏中的 Ca²⁺ 置换出土壤胶体里的交换性 Na⁺, 使 Na⁺ 从土壤胶体中转入土壤溶液^[16], 并随灌溉水进入地下或由排水渠排走, 以减轻土壤碱害。

钙源物脱硫石膏改良碱土时会改变土壤中 SOC 含量^[17]。由于土壤改良剂成分和施用量、土壤质地、气候条件、农田管理制度等的不同, 土壤改良后 SOC 含量呈现增加和减少 2 种截然不同的结果^[18]。这是由于脱硫石膏会通过增加 SOC 的淋溶和矿化减少 SOC 含量, 此外会通过增加 SOC 的物理性保护和促进作物土壤碳输入增加 SOC 含量。例如, 土柱实验发现, 与对照组相比, 施用脱硫石膏处理的有机碳的淋溶量明显增大^[19]。通过对土壤微生物群落功能多样性的研究发现, 脱硫石膏不仅能够明显提高土壤微生物活性, 而且有利于提高微生物群落对有机碳源的利用水平^[20]。在大田改良盐碱土的实验中, 发现脱硫石膏能使土壤的 Ca²⁺ 含量增加^[21], 形成稳定的团聚体, 从而增强黏土矿物的絮凝, 并提高土壤结构的稳定性, 最终提高对 SOC 的物理保护^[18]。在脱硫石膏对高风化土壤的施用中, 发现脱硫石膏能提高作物的生产力和生物量碳的输入^[22]。综上所述, 植被对作物的碳输入和脱硫石膏对土壤的影响都会改变土壤 SOC 含量, 但排除作物碳输入而只量化脱硫石膏对土壤 SOC 的影响则较少见诸于报道。本研究立足于新疆干旱区荒漠碱土, 采用田间小区试验的方法, 评估脱硫石膏对 0~100 cm 土壤剖面各土层 SOC 的影响, 量化 0~20 cm 改良土层 SOC 含量和土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD) 的变化, 阐明不同气候因子在土壤改良过程中的作用, 以期在土壤碱性得到改善的前提下, 使 SOC 损耗达到最小, 从而为干旱区盐碱土改良过程中减少碳排放提供科学依据。

1 试验

1.1 试验区概况

试验区位于中科院阜康荒漠国家生态系统观测站北部荒漠区(87°56′ E, 44°17′ N), 海拔461 m, 地处古尔班通古特沙漠南缘, 天山博格达峰北麓。该区域地形北低南高, 由东南向西北倾斜, 地貌由北向南依次为沙漠、绿洲和山地, 呈现明显的景观分异。主要分布的土壤类型有盐碱土、灰漠土、灌淤土等。气候属于典型的欧亚大陆温带荒漠气候, 夏季炎热干燥, 冬季漫长寒冷, 降水量少(年均降水量为152 mm)且蒸发量大(年均蒸发量为1897 mm)。年均气温为6.9℃, 气温变化范围为-41.6~42.6℃, 年均无霜期约为170 d, 年均日照时间约为2532.5 h^[23]。

1.2 试验设计

田间试验样地设置在阜康北部古尔班通古特沙漠南缘的自然荒漠区内, 在地势平坦的区域选择一个5 m×10 m的样地, 内部划分为80 cm×80 cm的小区, 小区四周放置60 cm深的防水塑料, 以防止灌溉过程中的相互影响, 并且每个小区之间设置有20 cm的隔离带。脱硫石膏施用量设置依据土壤Na⁺与Mg²⁺交换量, 即脱硫石膏理论施用量 $M = 1/2 \text{ 交换性 Na}^+ + \text{交换性 Mg}^{2+} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + 1/2 \text{ NaHCO}_3 + \text{MgCO}_3 + \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ^[10], 由此设计0、10、20、30、40 t/hm²共5个处理水平, 以不施用处理为对照组。每个处理水平设置4个实验小区, 其中3个小区用于土壤剖面取样, 1个小区用于土壤容重取样。为了防止土壤剖面取样对后期实验结果的影响, 当土壤剖面取样结束后, 用容重取样小区土壤进行分层回填处理。进行土壤改良时, 先将0~20 cm表土翻松, 再将脱硫石膏按试验设计施用量进行均匀施撒, 使脱硫石膏与0~20 cm土层土壤充分混合, 最后将土地整平。土壤改良深度为20 cm, 脱硫石膏初始时施用1次后不再施入, 灌溉水量依据盐碱土改良1800 m³/hm²灌溉标准进行灌溉^[3]。待改良土壤为荒漠碱土, 理化性质如表1所示。脱硫石膏样品来源为电厂煤烟气脱硫副产品, 主要化学组分如表2所示。在试验处理后的第3、6、10、15、23、32、46 d共7次用土钻“S”型采样, 采集小区内1 m剖面的分层土壤, 土壤取样剖面深度为0~20、>20~40、>40~60、>60~80、>80~100 cm。土壤容重取样选取在土壤相对稳定的实验末期进行, 采样方法为环刀法^[24]。

表1 待改良土壤的理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of soil to be improved

土壤类型	土层深度/cm	pH 值	电导率/(mS·cm ⁻¹)
碱土	0~20	9.73	0.68
	>20~40	9.88	0.75
	>40~60	9.76	0.68
	>60~80	9.63	0.75
	>80~100	9.42	0.64

表2 脱硫石膏的化学组分

Tab.2 Ingredients of desulfurized gypsum

组分	水分	CaSO ₃	CaSO ₄	CaCO ₃	其他
质量分数/%	5.9	4	80	0.5	9.6

1.3 测试项目及方法

将土壤样品带回实验室, 去除杂物, 自然风干, 磨碎, 过筛孔直径为2 mm筛后, 进行理化分析。土壤理化性质测试方法参照《土壤农业化学分析方法》^[24]。土壤测试项目包括pH、电导率(electrical conductivity, EC)、SOC、土壤容重。

SOCD 由 SOC 计算得出,计算方法^[16]为

$$Q = \sum_{i=1}^n KD_i H_i / 100, \quad (1)$$

式中: Q 为土壤的有机碳密度, kg/m^2 ; n 为土层数目; K_i 为第 i 层土壤的有机碳质量比, g/kg ; D_i 为第 i 层的土壤容重, g/cm^3 ; H_i 为第 i 层土壤的厚度, cm 。

1.4 数据处理

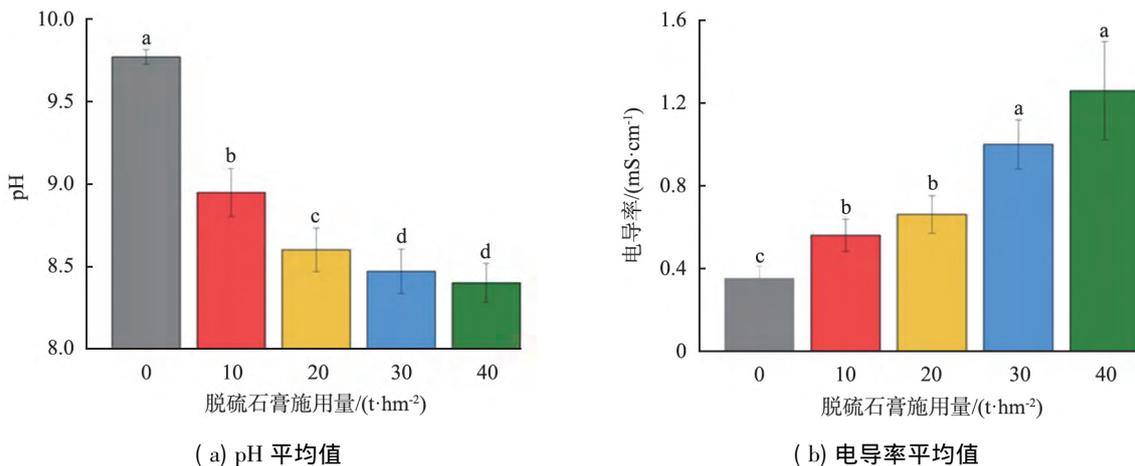
采用 Excel 2010 进行数据整理与处理, Origin 2017 进行点线图绘制、曲线拟合, SPSS 23 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、最小显著差检验(least significance difference, LSD), Canoco 5 进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 脱硫石膏的碱土改良效果

图 1 为不同处理水平下改良土层第 3~46 d 内 pH 和电导率(EC) 的平均值。由图 1(a) 可知, 施用脱硫石膏能显著降低改良土层的 pH。对于改善土壤碱性来说, 随着脱硫石膏施用量的增大, pH 逐渐减小。施用量为 $10 \sim 40 \text{ t}/\text{hm}^2$ 时, pH 分别为 8.95、8.60、8.47、8.40, 显著低于对照组的 pH 值 9.97($P < 0.05$)。其中, 施用量为 $30 \sim 40 \text{ t}/\text{hm}^2$ 时 pH 处于最低水平, 二者差别不显著($P > 0.05$) , 可以认为都具有最佳的改良碱性效果。

由图 1(b) 可知, 脱硫石膏在改良碱性的同时也会显著增加 EC。施用量为 $10 \sim 40 \text{ t}/\text{hm}^2$ 时, EC 分别为 0.56、0.66、1.00、1.26 mS/cm , 显著高于对照组 EC 值 0.35 mS/cm ($P < 0.05$)。其中, 施用量为 $30 \sim 40 \text{ t}/\text{hm}^2$ 时 EC 处于最高水平, 二者差别不显著($P > 0.05$) , 说明施用量达到 $30 \text{ t}/\text{hm}^2$ 时 EC 增大到稳定水平, 继续增大施用量无显著变化($P < 0.05$)。



注: 图中不同字母表示不同处理之间有显著差异($P < 0.05$) 相同字母则表示无显著差异($P > 0.05$)。

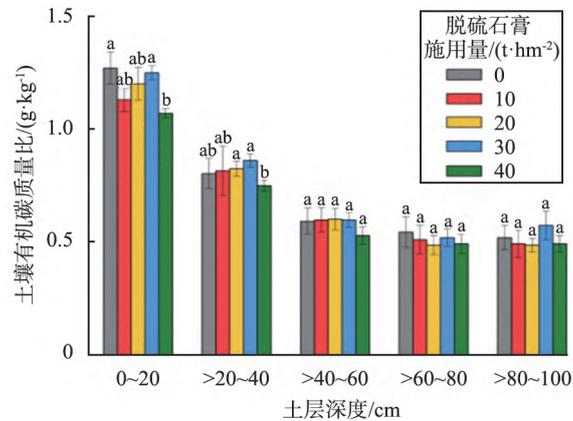
图 1 不同处理水平下改良土层第 3~46 d 内 pH 和电导率平均值

Fig.1 Average values of pH and conductivity in improved soil layer from 3 to 46 days under different treatment levels

2.2 不同深度土层 SOC 含量的变化

图 2 为不同处理水平下各土层第 3~46 d 内 SOC 含量的平均值。由图可知, 不同处理水平下改良土层 SOC 含量存在显著差异。在改良土层, 不同处理水平下的 SOC 含量平均值均低于对照组。仅当脱硫石膏施用量为 $40 \text{ t}/\text{hm}^2$ 时 SOC 含量才显著低于对照组($P < 0.05$) , 此时的质量比为 $1.07 \text{ g}/\text{kg}$, 较对照组低 $0.20 \text{ g}/\text{kg}$ 。施用量为 $10 \sim 30 \text{ t}/\text{hm}^2$ 处理下的质量比平均值分别为 1.13 、 1.20 、 $1.25 \text{ g}/\text{kg}$, 较对照组依次低 0.14 、 0.07 、 $0.02 \text{ g}/\text{kg}$ 。

脱硫石膏对不同深度土层 SOC 产生的影响不同,随土层深度的增加,所有处理土壤有机碳含量均减少,平均每 20 cm 的下降速率为 16%~20%。在 0~100 cm 土壤剖面中,各处理层 SOC 含量表层 0~20 cm 是下层 80~100 cm 的 2 倍。不同深度土层,在施用量为 40 t/hm² 处理下,0~20 cm 的改良土层和 20~40 cm 的土层 SOC 含量与对照组相比存在显著差异($P<0.05$),而深度大于 40 cm 的土层中,不同处理水平与对照组的差异不显著($P>0.05$),因此,脱硫石膏改良后对 SOC 的影响仅存在于深度为 0~40 cm 的土层。



注: 图中不同字母表示不同处理之间有显著差异($P<0.05$) 相同字母则表示无显著差异($P>0.05$)。

图2 不同处理水平下各土层第 3~46 d 内土壤有机碳含量平均值

Fig.2 Average soil organic carbon content in different soil layers during days 3–46 under different treatment levels

2.3 改良土层 SOC 含量的动态变化

图 3 为不同处理水平下改良土层 SOC 含量随时间变化的曲线。由图可知,改良土层 SOC 含量呈先下降后稳定的指数函数变化趋势。在土壤改良后的 46 d 里,各处理水平下改良土层 SOC 含量均呈下降趋势,在经历一段时间的下降之后达到平稳状态,下降范围在 0.42~0.61 g/kg 之间。总体上,随脱硫石膏施用量的增大,初期 SOC 含量下降增快。对照组的 SOC 含量下降最慢,大约在第 15 d 达到平稳状态。施用量为 10、20 t/hm² 时,SOC 含量下降加快,达到平稳状态的时间约为 10 d。当施用量继续增加到 30、40 t/hm² 时,SOC 含量下降速度最快,达到平稳状态仅用了大约 3 d。不同脱硫石膏施用量下,SOC 含量下降并达到稳定的时间差异明显,总体上达到稳定的时间随施用量的增大而缩短。不同的脱硫石膏施用量下,改良土层 SOC 含量达到平稳后的数值也存在不同,按不同处理由大到小 30、0、20、10、40 t/hm²,土壤有机碳质量比分别为 1.26、1.19、1.14、1.08、1.07 g/kg,与改良前对比降幅达 25%~36%。

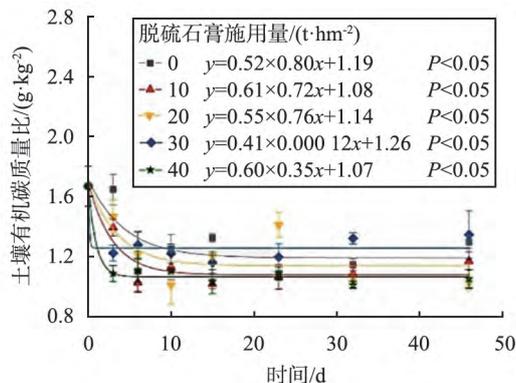
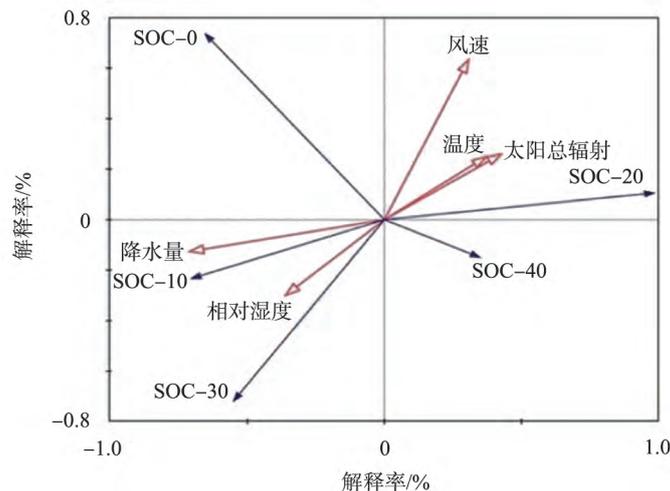


图3 不同处理水平下改良土层土壤有机碳含量的变化曲线

Fig.3 Change curves of soil organic carbon content in improved soil layers under different treatment levels

2.4 改良土层 SOC 变化的影响因素

冗余分析可以量化解释变量对响应变量的影响,图4为不同处理水平下改良土层土壤有机碳和气候因子长期变化的冗余分析。由图可知,不同气候因子对SOC的影响不同。降水量、相对湿度、风速、太阳总辐射、温度对SOC含量总体变化的解释率分别为37.8%、34.1%、13.5%、10.0%、4.6%,共为100%,在前2个轴解释率累积达到89.60%,说明前2个轴可以很好地解释SOC含量与气候因子长期变化之间的关系。气候因子对不同处理水平下SOC含量的影响不尽相同,甚至存在完全相反的作用。未施用脱硫石膏时,太阳总辐射和温度对改良土层SOC含量减少有促进作用,太阳总辐射的作用大于温度;降水量和风速对改良土层SOC含量减少则有抑制作用,降水量的作用大于风速。施用40 t/hm²脱硫石膏导致SOC显著下降时,降水量和相对湿度对改良土层SOC含量减少有促进作用,降水量的作用大于相对湿度;太阳总辐射和温度对改良土层SOC含量减少则有抑制作用,太阳总辐射的作用大于温度。



注: 响应变量用蓝色实心箭头表示,解释变量用红色空心箭头表示; 响应变量命名中的数字代表对应的脱硫石膏施用量,例如SOC-10表示SOC施用量为10 t/hm²; 横轴为轴1,纵轴为轴2。

图4 不同处理水平下改良土层土壤有机碳和气候因子长期变化的冗余分析
Fig.4 Redundancy analysis of long-term changes of soil organic carbon and climate factors in improved soil layers under different treatment levels

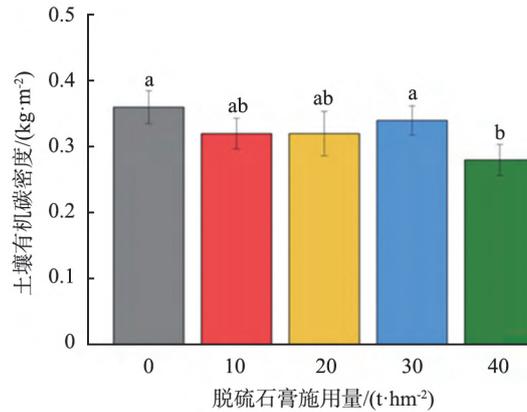
2.5 改良土层 SOCD 的变化

图5为不同处理水平下改良土层第3~46 d内SOCD的平均值。由图可知,不同处理水平下改良土层SOCD存在显著差异。脱硫石膏施用量为10~30 t/hm²时,SOCD分别为0.32、0.32、0.34 kg/m²,相较于对照组0.36 kg/m²无显著差异($P < 0.05$)。而施用量增加到40 t/hm²时,SOCD则显著低于对照组($P < 0.05$),SOCD达到最低值0.28 kg/m²,相较对照组低0.08 kg/m²,降幅达22%。

3 讨论

脱硫石膏施用量为30~40 t/hm²时,改良土层能获得最佳的碱性改良效果,但EC均处于最高水平。由于施用量为30 t/hm²时,EC小于1 mS/cm,因此不会对作物生长造成不利影响^[27-28]。考虑改良碱性效果、EC和脱硫石膏用量后,脱硫石膏施用量为30 t/hm²,改良效果最好。SOCD反映单位面积一定深度的土层土壤有机碳储量^[29]。在施用量为30 t/hm²时,SOC和SOCD与对照组相比无明显差异。换言之,在改良土层获得最佳的碱性改良效果的同时并不会造成SOC含量的下降。

图6为钙源物脱硫石膏对SOC的影响过程示意图。由图可知,脱硫石膏导致的SOC变化是多种过程共同作用的结果,主要有以下4种影响过程^[20]: 淋溶效应、有机质(organic matter,OM)矿化、对SOC的物理保护和碳输入。



注: 图中不同字母表示不同处理之间有显著差异($P < 0.05$) 相同字母则表示无显著差异($P > 0.05$)。

图5 不同处理水平下改良土层第3~46 d内土壤有机碳密度平均值

Fig.5 Average soil organic carbon density in improved soil layer during the 3–46 days under different treatment levels

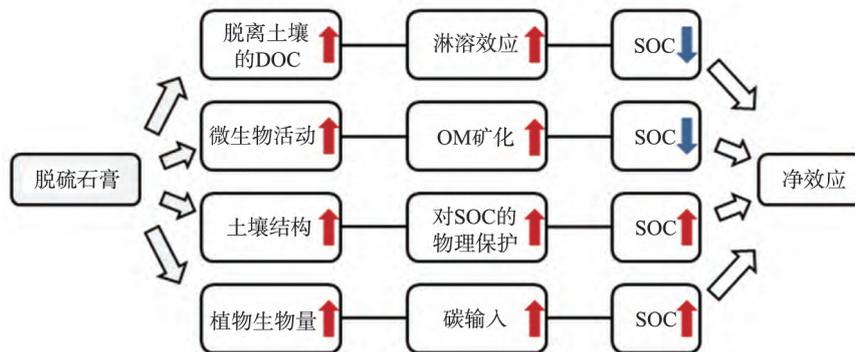


图6 钙源物脱硫石膏对土壤有机碳的影响过程示意图

Fig.6 Process of influence of calcium source desulfurized gypsum on soil organic carbon

3.1 淋溶的影响

淋溶效应会降低土壤表层 SOC 含量,使 SOC 向土体下层迁移^[28]。未施用脱硫石膏时,灌溉后土壤中的水随着时间的推移向下渗透,并带走了改良土层土壤中的 SOC,因此改良土层 SOC 含量的下降伴随着土壤含水量(soil water content, SWC)的下降。改良土层 SOC 含量长期变化与 SWC 存在显著正相关关系是这一过程的有力证明。其他相关研究^[29]也表明,施用脱硫石膏后有机碳的淋溶效应增强。对于森林土壤,脱硫石膏处理后浸出的 SOC 最多,最高浸出了表土中 SOC 总质量的 90% 以上。此外,土柱实验研究发现,随脱硫石膏施用量的增加,淋溶液中 SOC 含量逐渐增加,淋溶液有机碳含量与 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 呈正相关^[19]。与此相似,本研究中脱硫石膏的施用将 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 带入土体导致 EC 的上升,改良土层 SOC 含量长期变化与 EC 存在显著正相关关系,也支持了脱硫石膏的施用能促进 SOC 的淋溶这一观点。这可能是由于土壤溶液中的 SO_4^{2-} 会与 SOC 竞争交换正电荷位点, SO_4^{2-} 的浓度更大、结合能力更强,能将部分与土壤颗粒结合的 SOC 置换下来,使之被淋溶至土体下层^[30]。

3.2 矿化的影响

土壤溶液不仅能通过淋溶作用减少改良土层 SOC,而且能通过增加土壤湿度来缓解土壤微生物所受的水分胁迫,从而促进土壤微生物的生长和繁殖,最终促进 SOC 的矿化^[31]。脱硫石膏的施用使土壤的 pH 更接近中性^[32],降低了碱性对微生物的胁迫^[33],为微生物创造更加适宜的土壤环境。此外脱硫石膏的施用也增加土壤中 Ca^{2+} 的含量,更适合的 pH 环境和 Ca^{2+} 对微生物的刺激作用^[18],增加了土壤微生物功能的多样性^[20],改善土壤微生物的生长和丰度^[22],增加土壤微生物的活动,土壤微生物呼吸作

用得到增强^[18],从而促进了 SOC 的矿化。本研究中未施用脱硫石膏时(仍有灌溉),改良后初期改良土层 SOC 含量下降,大约在改良后 15 d 达到平稳状态,而施用量为 40 t/hm² 时,改良土层 SOC 含量下降更快,达到平稳状态仅用 3 d。

3.3 物理保护的影响

SOC 可以通过与土壤微生物及酶的物理隔离免于矿化,土壤团聚体中的有机碳稳定性很高,可在土壤团聚体中保存上万年^[33]。脱硫石膏的施用提高了土壤中 Ca²⁺ 的含量,通过增强黏土矿物的絮凝^[18],改善土壤的结构,有利于形成新的土壤团聚体,土壤团聚体的形成是导致 SOC 物理隔离的微观过程^[32]。土壤团聚体对 SOC 有包藏作用和吸附作用,从而增加了 SOC 的稳定性,降低了 SOC 的矿化速率,此外脱硫石膏产生的 Ca²⁺ 通过桥接等作用对 SOC 的稳定亦有所助益^[32],但由于土壤团聚体形成而受到保护的碳仅占 SOC 的一小部分,对于 SOC 的整体变化影响较小^[18],因此本研究中改良后土层的 SOC 仍呈下降趋势。正是因为这部分的 SOC 被保护起来,所以在几乎没有碳输入的情况下(地表无植被覆盖)改良土层 SOC 含量在经历下降后仍可以维持稳定在一个较低的水平(约 1.07 g/kg),而非趋近于 0。

3.4 碳输入的影响

脱硫石膏施用后土壤是否覆盖植物可能是 SOC 变化的决定性因素,甚至可以主导 SOC 的变化趋势,使实验结果反转。矿物保护主要决定了 SOC 在底层土壤中的稳定性,而植物碳的输入则在表层土壤中起主要作用^[34]。柳媛媛等^[35]的研究发现,生物碳的施入可显著提高表层土壤可溶性有机碳的含量。相关研究^[18]认为,由于土壤改良改善了土壤条件,增大了地表植被的生产力,植被凋落物和根系分泌物随即增多,从而扩大了向土壤的碳输入^[36-37],碳输入的增加使得 SOC 含量增大^[38]。植被生产力与 SOC 含量存在良性循环,植被生产力的提高会促进 SOC 含量增加,而 SOC 含量的增加也会促进植被生产力的提高^[39]。同样碱土土壤有机碳的含量低,原因是地表裸露造成土壤的碳输入少^[40]。有研究表明^[41],对盐碱土施用脱硫石膏有利于提高作物的发芽率,同时也有利于促进作物地下根系的生长。另一方面,施加脱硫石膏后 Ca²⁺ 增强了土壤颗粒的胶结力,促进了土壤团聚体的形成,进而显著提高了碱土含水量,促进作物生长,增加 SOC 的输入^[17]。对不同耕作制度的农田进行 Meta 分析发现,作物还田(相当于增加植被凋落物)能明显增加农田 SOC 含量^[18]。中长期 SOC 含量的稳定值主要是由特定的生态系统特性决定的^[34],例如在农业土壤中,果园和水田的 SOC 含量较高,旱地土壤次之,盐碱地土壤则较低^[9]。赵惠丽等^[42]采取秸秆还田和脱硫石膏配施改良盐碱土,可降低土壤表面的可交换 Na⁺ 的含量,提高土壤的团聚性;同时脱硫石膏能促进还田秸秆与土壤微生物之间的相互作用,使得 SOC 最终以不同的形态(包括秸秆残留物、土壤微生物的代谢产物和生物残骸)保留在土壤中,因此,如果能成功通过修复不利于植物生长的 pH 和 EC 等土壤条件,使地表植被的覆盖得以恢复,那么这些退化土地仍然有可能恢复到良好的土壤生态系统,从而使 SOC 含量得到增加。

4 结论

施用脱硫石膏与 0~20 cm 土壤均匀混合,并进行灌溉的碱土改良方法对土壤有机碳影响的研究结论如下:

- 1) 脱硫石膏施用量为 30 t/hm² 时,改良土层改碱效果最好,pH 为 8.24,电导率为 0.98 mS/cm。
- 2) 脱硫石膏对 SOC 的影响仅存在于深度为 0~40 cm 的改良土层,且仅当脱硫石膏施用量为 40 t/hm² 时,改良土层的 SOC 和 SOCD 才显著低于对照组,分别低 0.20 g/kg 和 0.08 kg/m²。
- 3) 改良土层 SOC 呈先下降后稳定的指数函数变化趋势。脱硫石膏施用量越大,SOC 含量达到稳定的时间越短,稳定后 SOC 含量越低。脱硫石膏施用量达到最大 40 t/hm² 时,SOC 含量达到稳定的时间最短为 3 d,稳定后土壤有机碳质量比最小为 1.07 g/kg。
- 4) 气候因子对改良土层 SOC 的作用存在差异。未施用脱硫石膏时,太阳总辐射和温度对改良土层 SOC 含量减少有促进作用,太阳总辐射的作用大于温度;降水量和风速对改良土层 SOC 含量减少则有抑制作用,降水量的作用大于风速。施用量为 40 t/hm² 时,降水量和相对湿度对改良土层 SOC 含量减

少有促进作用,降水量的作用大于相对湿度;太阳总辐射和温度对改良土层 SOC 含量减少则有抑制作用,太阳总辐射的作用大于温度。

参考文献(References):

- [1]GLEICK P H, ADAMS R M, AMASINO R M, et al. Climate change and the integrity of science [J]. *Science*, 2010, 328(5979): 689-690.
- [2]方精云,朱江玲,王少鹏,等. 全球变暖、碳排放及不确定性[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(10): 1385-1395.
FANG J Y, ZHU J L, WANG S P, et al. Global warming, carbon emissions and uncertainty [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011, 41(10): 1385-1395.
- [3]SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [4]王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. *地理研究*, 1999(4): 349-356.
WANG S Q, ZHOU C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China [J]. *Geographical Research*, 1999(4): 349-356.
- [5]HOUGHTON J T, FILHO L G M, CALLANDER B A, et al. *Climate change 1995: the science of climate change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 323-325.
- [6]WANG H Q, HALL C A S, CORNELL J D, et al. Spatial dependence and the relationship of soil organic carbon and soil moisture in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico [J]. *Landscape Ecology*, 2002, 17(8): 671-684.
- [7]MURAGE E W, KARANJA N K, SMITHSON P C, et al. Diagnostic indicators of soil quality in productive and non-productive smallholders fields of Kenya's central highlands [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2000, 79(1): 1-8.
- [8]张万银,郑旭,李斌,等. 基于 CNKI 数据库对新疆盐碱地治理研究现状与分析[J]. *农业与技术*, 2020, 40(9): 96-97.
ZHANG W Y, ZHENG X, LI B, et al. Research status and analysis of Xinjiang saline-alkali land management based on CNKI database [J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(9): 96-97.
- [9]WANG S J, CHEN Q, LI Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2017, 121: 82-92.
- [10]王遵亲,祝寿泉. *中国盐渍土* [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 445-446.
WANG Z Q, ZHU S Q. *Saline soil of China* [M]. Beijing: Science Press, 1993: 445-446.
- [11]马征,王学君,董晓霞,等. 改良剂作用下滨海盐化潮土团聚体分布、稳定性及有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 327-333.
MA Z, WANG X J, DONG X X, et al. Effects of soil amendments on distribution and stability of soil aggregates and organic carbon content in coastal salinized Fluvo-aquic soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 327-333.
- [12]樊丽琴,杨建国,尚红莺,等. 脱硫石膏施用于宁夏盐化碱土水盐运移特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 193-196.
FAN L Q, YANG J G, SHANG H Y, et al. Characteristics of soil water and salt movement in saline alkali soil treated with desulfurized gypsum [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 193-196.
- [13]孙在金,黄占斌,陆兆华. 不同环境材料对黄河三角洲滨海盐碱化土壤的改良效应[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 186-190.
SUN Z J, HUANG Z B, LU Z H. Improvement effects of different environmental materials on coastal saline-alkali soil in yellow river delta [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 186-190.
- [14]马玉涛,苑佰飞,张鹏,等. 硫酸铝对新开垦苏打盐碱水田的快速改良和培肥效果[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 325-330, 339.
MA Y T, YUAN B F, ZHANG P, et al. Effect of aluminium sulphate on rapid amelioration and fertility improvement of newly reclaimed soda saline-alkali paddy field [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 325-330, 339.
- [15]范富,张庆国,侯迷红,等. 玉米秸秆隔离层对西辽河流域盐碱土碱化特征及养分状况的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 131-137.
FAN F, ZHANG Q G, HOU M H, et al. Effect of maize straw isolation layer on alkalization characteristics and nutrient sta-

- tus of saline-alkali soil in west liaohe region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 131-137.
- [16] 谢乘陶. 盐渍土改良原理与作物抗性 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993: 187.
XIE C T. Principles of saline soil improvement and crop resistance [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993: 187.
- [17] 王著峰, 王玉刚, 陈园园, 等. 施加脱硫石膏对盐碱土固碳的影响 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 353-360.
WANG Z F, WANG Y G, CHEN Y Y, et al. Effects of applying flue gas desulfurization gypsum on carbon sequestration in saline-sodic soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 353-360.
- [18] PARADELO R, VIRTO I, CHENU C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: a review [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 202, 98-107.
- [19] 郭堃梅, 池宝亮, 黄学芳, 等. 碳酸钙与石膏对土壤磷及溶解有机碳淋溶的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2006(1): 128-130.
GUO H M, CHI B L, HUANG X F, et al. Effects of CaCO_3 and gypsum on leaching of phosphorus and dissolved organic carbon in soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 128-130.
- [20] 季凤霞, 许兴, 王学琴, 等. 脱硫废弃物施用对碱化土壤油葵生长及土壤酶活性的影响 [J]. *土壤通报*, 2011, 42(4): 962-966.
LI F X, XU X, WANG X Q, et al. Effect of sunflower growth and enzyme activity in alkali soil improvement with application of desulphurization byproducts [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 962-966.
- [21] 唐珧, 张强, 王斌, 等. 脱硫石膏改良重度苏打盐化土的环境效应 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 317-321.
TANG Y, ZHANG Q, WANG B, et al. Environmental effect of the amelioration of heavy soda saline soil using desulfurized gypsum [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 317-321.
- [22] INAGAKI T M, SA J C D, CAIRES E F, et al. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools and agronomic productivity in highly weathered soil [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 231: 156-165.
- [23] 王忠媛, 谢江波, 王玉刚, 等. 温度对盐土和碱土土壤无机 CO_2 通量的影响 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2525-2531.
WANG Z Y, XIE J B, WANG Y G, et al. Effects of temperature on inorganic CO_2 flux of saline soil and alkaline soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(10): 2525-2531.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 152-154.
LU R K. Methods for agricultural chemical analysis of soil [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 152-154.
- [25] 张二震, 刘慧英, 温泽林, 等. 不同电导率营养液对苦苣生长、产量与品质的影响 [J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(4): 438-443.
ZHANG E Z, LIU H Y, WEN Z L, et al. Effects of different electrical conductivity levels of nutrient solution on the growth, yield and quality of endive [J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 2017, 35(4): 438-443.
- [26] 吕福堂, 司东霞. 日光温室土壤盐分积累及离子组成变化的研究 [J]. *土壤*, 2004(2): 208-210.
LYU F T, SI D X. Study on soil salinity accumulating and ion constitution changing of sunlight greenhouse [J]. *Soil*, 2004(2): 208-210.
- [27] 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 基于 1 400 万土壤空间数据库的有机碳储量估算研究: 以中国东北三省为例 [J]. *地理科学*, 2004(5): 568-72.
SUN W X, SHI X Z, YU D S, et al. Estimation of soil organic carbon storage based on 1 4M soil database of China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004(5): 568-72.
- [28] 解怀亮, 王玉刚, 李彦, 等. 灌溉淋溶对土壤有机碳和无机碳及理化性质的影响 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 188-193.
JIE H L, WANG Y G, LI Y, et al. Impact of irrigation process in soil organic/inorganic carbon and physicochemical properties [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 188-193.
- [29] BELKACEM S, NYS C. Consequences of liming and gypsum top-dressing on nitrogen and carbon dynamics in acid forest soils with different humus forms [J]. *Plant and Soil*, 1995, 173(1): 79-88.
- [30] GOBRAN G R, NILSSON S I. Effects of forest floor leachate on sulfate retention in a spodosol soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1988, 17(2): 235-239.

- [31] LI M, JIANG L L, SUN Z J, et al. Effects of flue gas desulfurization gypsum by-products on microbial biomass and community structure in alkaline-saline soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(7): 1040-1053.
- [32] ROWLEY M C, GRAND S, VERRECCHIA E P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon [J]. *Biogeochemistry*, 2018, 137(1/2): 27-49.
- [33] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [34] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 406-413.
SU Z X, SU B Q, SHANGGUAN Z P. Advances in effects of plant litter decomposition on the stability of soil organic carbon [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 406-413.
- [35] 柳媛媛, 孙本华, 皮小敏, 等. 有机物料输入对关中壤土碳氮影响的后效作用 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 71-76.
LIU Y Y, SUN B H, PI X M, et al. Post-effect of organic material input on soil carbon and nitrogen on anthropogenic loess soil in guanzhou area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4): 71-76.
- [36] BRIEDIS C, DE MORAES SA J C, CAIRES E F, et al. Changes in organic matter pools and increases in carbon sequestration in response to surface liming in an oxisol under long-term no-till [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(1): 151-160.
- [37] 郑翔, 刘琦, 曹敏敏, 等. 森林土壤氧化亚氮排放对氮输入的响应研究进展 [J]. *土壤学报*, 2022, 59(5): 1190-1203.
ZHENG X, LIU Q, CAO M M, et al. A review of responses of soil nitrous oxide emissions to nitrogen input in forest ecosystems [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5): 1190-1203.
- [38] ZHANG W, ZHAO Y, WANG S, et al. Combined application of flue gas desulfurization gypsum and straw pellets to ameliorate sodicity, nutrient content, and aggregate stability of sodic soil [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(3): 1806-1816.
- [39] BROCK C, FLIESSBACH A, OBERHOLZER H R, et al. Relation between soil organic matter and yield levels of non-legume crops in organic and conventional farming systems [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(4): 568-575.
- [40] WONG V N L, DALAL R C, GREENE R S B. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: a laboratory incubation [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(1): 29-40.
- [41] 韩剑宏, 李艳伟, 张连科, 等. 生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9): 5291-5297.
HAN J H, LI Y W, ZHANG L K, et al. Effect of biochar and FGD-gypsum application on soil basic physical and chemical properties and maize growth of saline soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(9): 5291-5297.
- [42] 赵惠丽, 于金芝, 刘涛, 等. 秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 [J/OL]. *环境科学*, [2023-04-03]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202208047>.
ZHAO H L, YU J Y, LIU T, et al. Application of desulphurized gypsum with straw to improve physicochemical properties of saline-alkali land in yellow river delta [J/OL]. *Environmental Science*, [2023-04-03]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202208047>.

(责任编辑: 赵 雁)