

木本泥炭和脱硫石膏对兰州新区盐碱土质量及作物产量的影响^①

邓超超^{1,2}, 周彦芳^{1,2*}, 刘 强^{1,2}, 宿翠翠^{1,2}, 王振龙^{1,2}, 张 靖^{1,2}, 周 琦^{1,2}, 施志国^{1,2}, 张英英^{1,2}

(1 甘肃省农业工程技术研究院, 兰州 730030; 2 武威市农田土壤改良与耕地保育技术创新中心, 甘肃武威 733006)

摘 要: 针对兰州新区土壤质量较差及盐碱化日益严重的问题, 于 2022—2023 年开展了田间试验, 探究 2 种作物(C1: 红豆草, C2: 小麦)和 3 种土壤改良方式(A0: 传统施肥, A1: 木本泥炭 9.0 t/hm²+有机物料 3.0 t/hm²+传统施肥, A2: 脱硫石膏 7.5 t/hm²+有机物料 3.0 t/hm²+传统施肥)对兰州新区盐碱土 0~30 cm 耕层土壤理化性质、养分含量、酶活性、微生物生物量碳氮及作物产量的影响。结果表明: ①与 A0 相比, 添加木本泥炭和脱硫石膏能有效降低土壤容重、pH 和水溶性盐含量, 提高土壤有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量, 其中 C1A1 和 C2A1 处理组合效果更为明显, 但二者之间差异不显著。②与 A0 相比, C1A1 和 C2A1 处理组合的土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶活性、微生物生物量碳、微生物生物量氮含量分别显著提高 24.74% 和 23.61%、49.48% 和 48.14%、71.32% 和 69.77%、38.37% 和 35.93%、29.54% 和 29.68%、106.26% 和 112.51%($P<0.05$)。③土壤质量指数大小顺序为: C1A1(0.68)>C2A1(0.64)>C1A2(0.56)>C2A2(0.54)>C1A0(0.40)>C2A0(0.37), 红豆草生物量大小顺序: C1A1>C1A2>C1A0, 小麦秸秆生物量和籽粒产量大小顺序均为: C2A1>C2A2>C2A0, 土壤质量指数与作物产量呈显著正相关(与红豆草生物量、小麦秸秆生物量和籽粒产量的 R^2 分别为 0.9224、0.9522 和 0.9415, $P<0.05$)。综上, 在兰州新区盐碱土改良和肥力提升中, 推荐采用 A1 改良模式。

关键词: 兰州新区; 盐碱地; 土壤改良剂; 木本泥炭; 脱硫石膏; 土壤质量

中图分类号: S156.2; S154.2 **文献标志码:** A

Effects of Woody Peat and Desulfurized Gypsum on Saline-alkali Soil Quality and Crop Yield in Lanzhou New Area

DENG Chaochao^{1,2}, ZHOU Yanfang^{1,2*}, LIU Qiang^{1,2}, SU Cuicui^{1,2}, WANG Zhenlong^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, ZHOU Qi^{1,2}, SHI Zhiguo^{1,2}, ZHANG Yingying^{1,2}

(1 Gansu Academy of Agricultural Engineering Technology, Lanzhou 730030, China; 2 Wuwei Technical Innovation Center for Farmland Soil Improvement and Farmland Conservation, Wuwei, Gansu 733006, China)

Abstract: In response to the problems of poor soil quality and increasingly severe salinization in Lanzhou New Area, A field experiment was carried out from 2022 to 2023 to explore the effects of two types of crops (C1: *Sainfoin*, C2: Wheat) and 3 soil improvement methods (A0: traditional fertilization, A1: 9.0 t/hm² woody peat + 3.0 t/hm² organic materials + traditional fertilization, A2: 7.5 t/hm² desulfurized gypsum + 3.0 t/hm² organic materials + traditional fertilization) on soil physiochemical properties, nutrient contents, enzyme activities, microbial carbon and nitrogen of the 0–30 cm cultivated layers, as well as the crop yields of saline-alkali lands in Lanzhou New Area. The results showed that: 1) Compared with A0, the addition of woody peat and desulfurized gypsum effectively reduced soil bulk density, pH and water-soluble salt content, and increased the contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available phosphorus, and available potassium. C1A1 and C2A1 treatments had more obvious effects, but there was no significant difference between them. 2) Compared with A0, the activities of soil invertase, urease, catalase, alkaline phosphatase, and the

①基金项目: 甘肃省民生科技专项-科技特派员(基地)专项(23CXNH0019)、甘肃省科技重大专项-农业领域(24ZDNA008)、甘肃省技术创新引导计划-区域科技合作与创新发展专项(21CX6QA026)、兰州市科技项目-科技支撑专项(2024-8-40)和甘肃省自然科学基金(24JRR689)资助。

* 通信作者(151245056@qq.com)

作者简介: 邓超超(1990—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤改良与地力提升研究。E-mail: 865851869@qq.com

contents of microbial carbon and nitrogen under C1A1 and C2A1 treatments were significantly increased by 24.74% and 23.61%, 49.48% and 48.14%, 71.32% and 69.77%, 38.37% and 35.93%, 29.54% and 29.68%, 106.26% and 112.51%, respectively ($P<0.05$). 3) The order of soil quality index was: C1A1 (0.68) > C2A1 (0.64) > C1A2 (0.56) > C2A2 (0.54) > C1A0 (0.40) > C2A0 (0.37), the order of the biomass of *Sainfoin* straw was: C1A1 > C1A2 > C1A0, and the order of the biomass of wheat straw and the grain yield was both: C2A1 > C2A2 > C2A0. There was a significant positive correlations between soil quality index and crop yields (the R^2 values of the biomass of *Sainfoin* straw, the biomass of wheat straw and the grain yield were 0.9224, 0.9522 and 0.9415, respectively, $P < 0.05$). In conclusion, for the improvement of saline-alkali soil and the enhancement of soil fertility in Lanzhou New Area, the improvement mode of A1 is recommended.

Key words: Lanzhou New Area; Saline-alkali land; Soil improver; Woody peat; Desulfurization gypsum; Soil quality

土壤盐渍化已经成为一个全球性的问题。国土“三调”结果显示,我国约有盐碱地 1.15 亿亩(15 亩=1 hm²),主要分布于西北内陆盐碱区、黄河上中游盐碱区、东北松嫩平原盐碱区、滨海盐碱区和黄淮海平原盐碱区^[1]。兰州新区位于黄土高原西北部,表层土壤为第四纪洪冲积黄土质砂壤土,之下为盐碱含量较高的砂砾,土壤 pH 高、有机质/腐殖质缺乏,肥力差,加之传统农业生产水资源利用方式的多年影响,造成部分灌溉土壤次生盐渍化现象加剧,因此改善土壤生态环境质量成为兰州新区的一项重要任务^[2]。

施用土壤改良剂是盐碱土改良的一个重要措施,具有见效快、材料配方灵活多样等特点^[3]。但我国盐碱化土壤分布地域广泛,不同区域盐碱土的类型及成因各有不同,土壤质量提升及盐碱土壤改良措施及效果可能会存在差异^[4]。施用脱硫石膏改良盐碱土壤在宁夏、吉林和内蒙古等地已被证实为一种有效措施^[5-7]。木本泥炭因具有腐殖质含量高、纤维素丰富、疏松多孔、保水保肥性能优等特点也已被广泛应用于土壤质量提升和盐碱土壤改良^[8-9]。研究表明,木本泥炭材料能够提高土壤有效水分、改善土壤保水性能,通过减少地表水分蒸发减缓土壤水盐运动,缓解土壤盐渍化^[10-11];此外,木本泥炭配施有机物料能有效调节土壤固、液、气三相比,改善土壤结构,提高土壤养分有效性,增强土壤微生物活性^[12-13]。

针对兰州新区土壤质量整体较差的实际情况和土壤盐碱化及次生盐碱化日益严重的问题,鉴于木本泥炭和脱硫石膏用于兰州新区土壤质量提升及盐碱土壤改良的研究报道甚少,依托本课题组前期的研究

成果,本研究选用以上 2 种土壤改良剂,以传统种植作物小麦和绿肥作物红豆草为供试作物,设置不同的处理,开展兰州新区盐碱土壤改良试验,通过比较分析不同处理对土壤物理、化学、生物学和作物产量的影响,旨在筛选出土壤质量提升及盐碱土壤改良效果好、作物产量高的改良模式,为兰州新区及类似地区土壤质量提升及盐碱土壤改良提供理论与实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 3 月—2023 年 10 月在兰州新区药物碱厂(36°34 N', 103°43'E, 海拔 1 910 m)开展,试验用地为 2021 年 8 月由撂荒地新垦的耕地。该区属于半干旱大陆性气候,气候干燥,多年平均降水量 288 mm,年均蒸发量 1 888 mm,日照时数 1 744~2 659 h,土壤质地以粉砂质黏壤土和黏壤土为主。灌溉方式为滴灌,试验开展前按照“S”形 8 点土钻采集 0~30 cm 的耕层土壤基本理化性质为: pH 8.60,水溶性盐含量 6.43 g/kg,容重 1.58 g/cm³,总孔隙度 40.38%,有机质 10.26 g/kg,全氮 0.63 g/kg,全磷 0.28 g/kg,全钾 1.63 g/kg,碱解氮 46.93 mg/kg,有效磷 2.39 mg/kg,速效钾 38.45 mg/kg,土壤呈碱性,养分含量低,理化性状差。

1.2 供试材料

供试红豆草品种选用甘肃红豆草(C1),小麦品种选用当地主栽品种宁春 9 号(C2),供试土壤改良剂包括木本泥炭、脱硫石膏和有机肥,其基本理化性质信息见表 1。

表 1 有机物料来源及成分信息
Table 1 Information of sources and compositions of tested organic materials

材料名称	来源	理化性质
木本泥炭	北京中向利丰公司	全氮 0.63%, 全磷 0.03%, 全钾 0.04%, 有机质 68.69%, pH 5.48
脱硫石膏	宁夏宁东能源化工厂	灰白色粉末, 主要成分 CaSO ₄ ·2H ₂ O 含量 88.7%, pH 7.83, 可溶性盐含量 7.18 g/kg
有机肥	甘肃绿能农业科技股份有限公司	全氮 0.55%, 全磷 0.04%, 全钾 0.04%, 有机质 44.80%, pH 7.89

1.3 试验设计

本试验依托课题组对土壤改良模式的研究基础,设置 2 种作物(C1: 红豆草, C2: 小麦)和 3 种土壤改良方式(A0: 传统施肥,施 N 225 kg/hm², P₂O₅ 375 kg/hm², K₂O 37.5 kg/hm², A1: 木本泥炭 9.0 t/hm²+有机肥 3.0 t/hm²+传统施肥, A2: 脱硫石膏 7.5 t/hm²+有机肥 3.0 t/hm²+传统施肥,共 6 个处理组合(见表 2),每个处理重复 3 次,小区面积为 80.0 m² (20.0 m×

4.0 m),随机区组排列,各小区之间设 0.4 m 宽的隔离行。2022—2023 年试验设计及施肥量见(表 2)。两类作物的播期均为每年 3 月中下旬,小麦播量 337.5 kg/hm²,红豆草播量 60 kg/hm²,红豆草生育中期刈割 1 次后不再刈割,小麦 7 月下旬收获,10 月初将小麦和红豆草秸秆用旋耕机打碎(长度 10~20 cm)翻入土壤,深度 20~30 cm。灌水、锄草等田间管理按当地农事操作进行。

表 2 试验设计和各处理施肥量
Table 2 Experimental design and fertilization amount of each treatment

处理组合	2022 年施肥量	2023 年施肥量
C1A0	传统施肥(N 225 kg/hm ² , P ₂ O ₅ 375 kg/hm ² , K ₂ O 37.5 kg/hm ²)	N 225 kg/hm ² ,
C1A1	木本泥炭 9.0 t/hm ² +有机肥 3.0 t/hm ² +传统施肥	P ₂ O ₅ 375 kg/hm ² ,
C1A2	脱硫石膏 7.5 t/hm ² +有机肥 3.0 t/hm ² +传统施肥	K ₂ O 37.5 kg/hm ²
C2A0	传统施肥(N 225 kg/hm ² , P ₂ O ₅ 375 kg/hm ² , K ₂ O 37.5 kg/hm ²)	
C2A1	木本泥炭 9.0 t/hm ² +有机肥 3.0 t/hm ² +传统施肥	
C2A2	脱硫石膏 7.5 t/hm ² +有机肥 3.0 t/hm ² +传统施肥	

1.4 样品采集与指标测定

1.4.1 土壤样品采集 试验期间(2022—2023 年)每年在作物收获后(7 月下旬)在各小区同样按照“S”形 8 点土钻和环刀采集 0~30 cm 耕层土壤样品,混匀后除去根系等杂物,带回实验室,一份自然风干,测定土壤理化指标,一份-20℃保存,用于测定土壤微生物指标。

1.4.2 土壤样品测定计算指标 本研究涉及 15 个土壤指标测定方法参照《土壤农业化学分析方法》^[14],其中 pH, S210 型 pH 计(土水比 1:2.5);水溶性盐含量, S230 型电导率仪(土水比 1:5);容重,环刀法;有机质, K₂Cr₂O₇ 氧化-容量法;全氮,凯氏定氮法;硝态氮,双波长光度法;铵态氮, KCl 浸提-靛酚蓝比色法;有效磷, NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法;速效钾, NH₄OAc 浸提-火焰光度计法;蔗糖酶活性, 3, 5-二硝基水杨酸比色法;脲酶活性, 苯酚钠-次氯酸钠比色法;过氧化氢酶活性, 高锰酸钾滴定法;碱性磷酸酶活性, 磷酸苯二钠比色法;微生物生物量碳、氮, 氯仿熏蒸法-K₂SO₄ 浸提-碳氮联合分析仪(Tekmar Lotix), 并计算微生物生物量 C/N 比。

1.4.3 作物产量测算 7 月下旬在各小区内选取 1 个具有代表性的 2.0 m×2.0 m 样方,分别计算小麦籽粒产量,称重作物地上部生物量(小麦秸秆和红豆草生物量),并换算公顷(hm²)产量。

1.4.4 土壤质量指数(Soil quality index, SQI)计算方

法 采用线性计算模型^[15],将 1.4.2 中的 16 个指标转化为 0~1 的无量纲分数。本研究中采用“越多越好”型指标(包括有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷、速效钾、蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、碱性磷酸酶活性、微生物生物量碳、微生物生物量氮)评分函数式(1)和“越少越好”型指标(包括 pH、水溶性盐含量、容重、土壤微生物生物量 C/N 比)评分函数式(2)。

$$S_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{1}$$

$$S_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{2}$$

式中: S_i 代表线性指标得分(0~1); X_i 代表指标实测值; X_{max} 代表指标最大值; X_{min} 代表指标最小值。

为了计算耕层(0~30 cm)土壤质量指数,先对本研究检测土壤指标进行主成分分析,获取各指标公因子方差,计算指标公因子方差与公因子方差之和的比值,即得到各项指标权重值^[16],然后用式(3)计算土壤质量指数,土壤质量指数数值越高,表明土壤质量越好。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \tag{3}$$

式中: SQI 为土壤质量指数; W_i 为第 i 项指标权重值; S_i 为第 i 项指标得分; n 为各数据集指标数量(n=16)。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2020 进行数据整理和作图,采用

SPSS 21.0 进行方差分析, 多重比较和相关分析($P<0.05$ 或 $P<0.01$), 主成分分析和相关性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤物理性质的影响

表 3 是 2022 年和 2023 年不同处理下的土壤物理性质, 由表 3 可见, A1 和 A2 均能显著改善土壤物理性质, A1 效果更为显著, 但 C1A1 和 C2A1 间效果差异不显著。以 2022 年为例, 与 C1A0 相比, 2022 年 C1A1、C1A2 土壤 pH 分别降低 0.07 和 0.04 个单位($P<0.05$), 水溶性盐含量分别降低 14.75% 和 12.62%($P<0.05$), 容重降低 7.53% 和 4.79%($P<0.05$); 与 C2A0, 2022 年 C2A1、C2A2 土壤 pH 分别降低 0.07 和 0.06 个单位($P<0.05$), 水溶性盐含量降低 12.77% 和 10.28%($P<0.05$), 容重分别降低 8.00% 和 6.00%($P<0.05$)。

如果以 2022 年和 2023 年两年的指标均值比较来看(表 3), A1 改善土壤物理性状的效果最为显著, 与 C1A0 相比, C1A1 的土壤 pH、水溶性盐含量和容重分别降低 0.11 个单位、10.66% 和 6.99%($P<0.05$); 与 C2A0 相比, C2A1 土壤 pH、水溶性盐含量、容重分别降低 0.10 个单位、9.74% 和 7.53%($P<0.05$)。说明 A1 改善土壤物理性状的效果优于 A2。

表 3 不同处理对土壤物理性质的影响
Table 3 Soil physical properties under different treatments

年份	处理组合	pH	水溶性盐含量(g/kg)	容重(g/cm ³)
2022	C1A0	8.33a	6.10a	1.46a
	C1A1	8.26c	5.20bc	1.35d
	C1A2	8.29b	5.33b	1.39bc
	C2A0	8.34a	6.03a	1.50a
	C2A1	8.27bc	5.26b	1.38cd
	C2A2	8.28bc	5.41b	1.41b
2023	C1A0	8.35a	3.66ab	1.39b
	C1A1	8.19d	3.52b	1.30d
	C1A2	8.26b	3.65ab	1.35c
	C2A0	8.36a	3.83a	1.42a
	C2A1	8.22cd	3.64ab	1.31d
	C2A2	8.23bc	3.76a	1.34c
均值	C1A0	8.34a	4.88a	1.43a
	C1A1	8.23c	4.36c	1.33d
	C1A2	8.28b	4.49bc	1.37c
	C2A0	8.35a	4.93a	1.46a
	C2A1	8.25bc	4.45bc	1.35cd
	C2A2	8.26b	4.58b	1.38b

注: 同列不同小写字母表示同一年份不同处理之间差异达显著水平($P<0.05$); 下同。

2.2 不同处理对土壤养分含量的影响

表 4 是 2022 年和 2023 年不同处理下的土壤养分状况, 由表 4 可见, A1 和 A2 均能显著提高土壤养分含量, A1 提高效果更为显著, 但 C1A1 和 C2A1 间提升效果差异不显著。以 2022 年为例, 与 C1A0 相比, C1A1 和 C1A2 的有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量分别显著提高 15.44% 和 10.47%、22.22% 和 4.94%、62.28% 和 42.05%、39.65% 和 25.94%、59.38% 和 43.75%、11.86% 和 6.47% ($P<0.05$); 与 C2A0 相比, C2A1 和 C2A2 的有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量分别显著提高 12.47% 和 9.79%、23.08% 和 1.28%、76.78% 和 38.99%、38.01% 和 12.35%、53.88% 和 53.10%、5.16% 和 11.10% ($P<0.05$)。

如果以 2022 年和 2023 年两年的指标均值比较(表 4)来看, A1 提升耕作土壤养分含量的效果最为显著, 与 C1A0 相比, C1A1 有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量分别显著提高 28.24%、27.78%、66.71%、27.70%、33.23% 和 10.94% ($P<0.05$); 与 C2A0 相比, C2A1 的有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量分别显著提高 27.65%、31.76%、66.95%、26.44%、39.33% 和 5.29% ($P<0.05$)。表明 A1 提升耕作土壤养分含量的效果优于 A2。

2.3 不同处理对土壤酶活性和微生物生物量碳、氮的影响

表 5 是 2022 年和 2023 年不同处理对土壤酶活性的影响, 由表 5 可见, A1 和 A2 均能显著提高土壤酶活性, 以 A1 提高效果更佳, 但 C1A1 和 C2A1 间提升效果差异不显著。以 2022 年为例, 与 C1A0 相比, C1A1 和 C1A2 的土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶的活性分别显著提升 26.02% 和 9.68%、45.79% 和 25.70%、93.81% 和 62.89%、28.67% 和 23.78% ($P<0.05$); 与 C2A0 相比, C2A1 和 C2A2 的土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶的活性分别显著提升 24.85% 和 10.89%、46.54% 和 22.38%、83.00% 和 62.00%、28.06% 和 25.18% ($P<0.05$)。

如果以 2022 年和 2023 年两年土壤酶活性均值(表 5)来看, A1 提升土壤酶活性的效果最为显著, 与 C1A0 相比, C1A1 土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活性分别显著提高 24.74%、49.48%、71.32% 和 38.37% ($P<0.05$); 与 C2A0 相比, C2A1 的土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶的活

表 4 不同处理对土壤养分含量的影响
Table 4 Soil nutrient contents under different treatments

年份	处理组合	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	硝态氮(mg/kg)	铵态氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
2022	C1A0	13.28b	0.81bc	6.23c	4.01c	2.56c	120.44d
	C1A1	15.33a	0.99a	10.11a	5.60a	4.08a	134.72a
	C1A2	14.67ab	0.85b	8.85b	5.05b	3.68b	128.23b
	C2A0	13.07b	0.78c	5.77c	4.13c	2.58c	119.18d
	C2A1	14.70ab	0.96a	10.20a	5.70a	3.97a	125.33c
	C2A2	14.35ab	0.79c	8.02b	4.64bc	3.95a	132.41a
2023	C1A0	15.54d	0.99c	8.72d	5.81c	3.81c	134.89d
	C1A1	21.62a	1.30a	14.82a	6.93a	4.42a	148.55a
	C1A2	19.30bc	1.15b	13.67b	6.57ab	4.17b	143.04bc
	C2A0	14.49d	0.91d	8.57d	5.93c	3.42d	132.46d
	C2A1	20.47ab	1.28a	13.73b	7.02a	4.39a	139.61c
	C2A2	18.85c	1.05c	12.64c	6.30bc	4.11b	145.43ab
均值	C1A0	14.41d	0.90c	7.48c	4.91c	3.19c	127.67d
	C1A1	18.48a	1.15a	12.47a	6.27a	4.25a	141.63a
	C1A2	16.99bc	1.00b	11.26b	5.81ab	3.93b	135.64b
	C2A0	13.78d	0.85d	7.17c	5.03c	3.00d	125.82d
	C2A1	17.59ab	1.12a	11.97a	6.36a	4.18a	132.47bc
	C2A2	16.60c	0.92c	10.33b	5.47bc	4.03b	138.92a

表 5 不同处理对土壤酶活性的影响
Table 5 Soil enzyme activities under different treatments

年份	处理组合	蔗糖酶活性 (mg/(g·d))	脲酶活性 (mg/(g·d))	过氧化氢 酶活性 (mg/(g·d))	碱性磷酸 酶活性 (mg/(g·d))
2022	C1A0	6.61c	6.42d	0.97c	1.43c
	C1A1	8.33a	9.36a	1.88a	1.84a
	C1A2	7.25b	8.07b	1.58b	1.77ab
	C2A0	6.52d	6.21d	1.00c	1.39c
	C2A1	8.14ab	9.10a	1.83a	1.78ab
	C2A2	7.23bc	7.60c	1.62b	1.74b
2023	C1A0	9.06c	9.02c	1.60c	2.00c
	C1A1	11.23a	13.71a	2.54a	2.91a
	C1A2	10.16b	11.60c	2.33b	2.45b
	C2A0	8.97cd	8.83c	1.57c	1.95c
	C2A1	11.01a	13.18b	2.55a	2.75a
	C2A2	10.25b	11.21c	2.32b	2.37b
均值	C1A0	7.84c	7.72c	1.29c	1.72c
	C1A1	9.78a	11.54a	2.21a	2.38a
	C1A2	8.71b	9.84b	1.96b	2.11b
	C2A0	7.75c	7.52c	1.29c	1.67c
	C2A1	9.58a	11.14ab	2.19ab	2.27ab
	C2A2	8.74b	9.41bc	1.97b	2.06b

性分别显著提高 23.61%、48.14%、69.77% 和 35.93% ($P<0.05$)。表明 A1 提升土壤酶活性的效果优于 A2。

表 6 是 2022 年和 2023 年不同处理对微生物生物量碳、氮和微生物生物量 C/N 比的影响,由表 6 可见,A1 和 A2 均能显著提高微生物生物量碳、氮和微生物生物量 C/N 比,A1 提高效果更佳,但 C1A1 和 C2A1 间提升效果差异不显著。以 2022 年为例,与 C1A0 相比,C1A1 和 C1A2 微生物生物量碳和微生物生物量氮分别显著提高 35.51% 和 31.66%、108.02% 和 97.13%($P<0.05$);与 C2A0 相比,C2A1 和 C2A2 微生物生物量碳和微生物生物量氮分别显著提高 34.50% 和 8.78%、20.97% 和 53.11%($P<0.05$)。

如果比较 2022 年和 2023 年两年的微生物生物量碳和微生物生物量氮均值(表 6),A1 提高微生物生物量碳、微生物生物量氮最为显著。与 C1A0 相比,C1A1 的微生物生物量碳和微生物生物量氮分别显著提高 29.54% 和 106.26%($P<0.05$);与 C2A0 相比,C2A1 的微生物生物量碳和微生物生物量氮分别显著提高 106.26% 和 15.37%($P<0.05$)。

由表 6 可知,C1A0 和 C2A0 两年间微生物生物量 C/N 比范围介于 8.77~9.47(细菌碳氮比为 5 : 1,放线菌为 6 : 1,真菌为 10 : 1),说明 C1A0 和 C2A0 土壤微生物群落结构不稳定,真菌和放线菌占比大,细菌占比小,土壤生态功能脆弱;A1 和 A2 的 C/N 比较低,介于 5.24~6.29,说明土壤中细菌和真菌占

比大，土壤生态功能较稳定。C1A1 和 C2A1 的微生物生物量 C/N 比两年均值分别为 5.58 和 5.67，说明 C1A1 和 C2A1 更有助于提高微生物生物量碳、氮，稳定土壤微生物群落结构，提高土壤生态功能。

表 6 不同处理对土壤微生物生物量碳、氮和 C/N 的影响
Table 6 Soil microbial biomass carbon, nitrogen contents and C/N ratios under different treatments

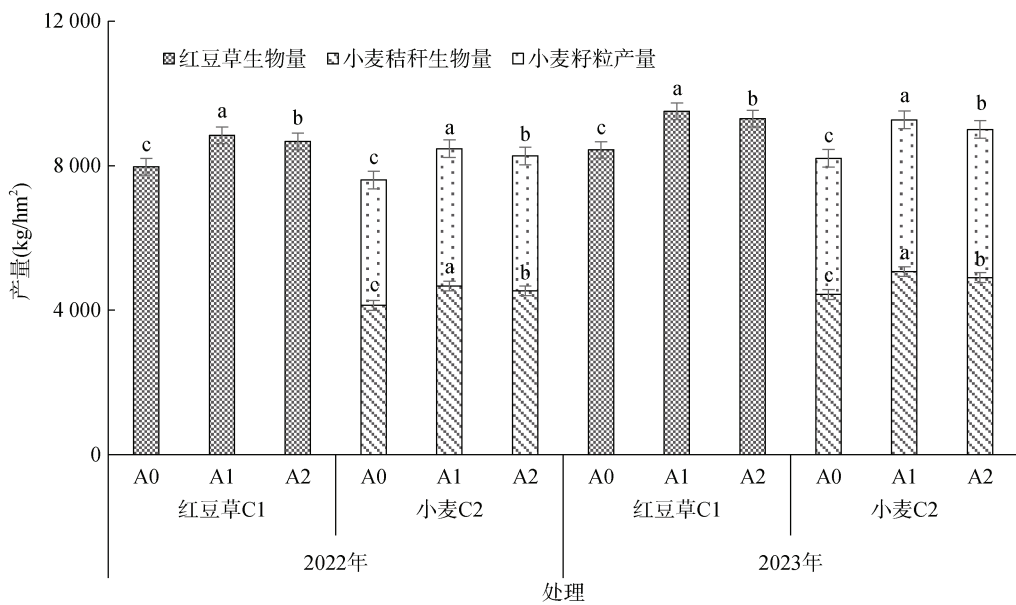
年份	处理组合	土壤微生物生物量碳 (mg/kg)	土壤微生物生物量氮 (mg/kg)	土壤微生物生物量 C/N 比
2022	C1A0	106.20b	11.84c	8.95
	C1A1	143.91a	24.63a	5.86
	C1A2	139.82a	23.34a	6.02
	C2A0	104.50b	11.07c	9.47
	C2A1	140.55a	23.61a	5.96
	C2A2	113.67b	18.66b	6.13
2023	C1A0	85.08c	9.71e	8.77
	C1A1	103.88a	19.82a	5.24
	C1A2	105.32a	17.06c	6.18
	C2A0	81.37c	8.92e	9.15
	C2A1	100.49ab	18.87b	5.33
	C2A2	96.25b	15.32d	6.29
均值	C1A0	95.64c	10.78d	8.88
	C1A1	123.90a	22.23a	5.58
	C1A2	122.57a	20.20b	6.07
	C2A0	92.94c	10.00d	9.33
	C2A1	120.52a	21.24ab	5.67
	C2A2	104.96b	16.99c	6.20

2.4 不同处理对作物地上部生物量和籽粒产量的影响

由图 1 可以看出，A1 和 A2 均能显著提高 C1 和 C2 的产量，且 A1 产量提高效果最明显。与 C1A0 相比，2022 年和 2023 年 C1A1 和 C1A2 红豆草生物量分别显著提高 10.88% 和 8.79%、12.65% 和 10.28%；与 C2A0 相比，2022 年和 2023 年 C1A1 和 C1A2 小麦秸秆生物量分别提高 12.90% 和 9.68%、14.29% 和 10.53%，小麦籽粒产量分别提高 9.62% 和 7.69%、11.85% 和 8.85%。如果比较 2022 年和 2023 年两年作物生物量和籽粒产量均值，C1A1 红豆草生物量较 C1A0 显著提高 11.76%，C2A1 小麦秸秆生物量、籽粒产量分别较 C2A0 显著提高 13.59%、10.56%。表明两种作物配施 A1、A2 能显著提高作物生物量和产量，且 A1 效果更佳。

2.5 不同处理对土壤质量指数的影响

本研究获取的各指标权重见表 7。
图 2 是不同处理的土壤质量指数，由图 2 可见，A1、A2 均能显著提高土壤质量指数，且 A1 效果更显著。不同处理土壤质量指数由高至低顺序为：C1A1 (0.68)>C2A1(0.64)>C1A2(0.56)>C2A2(0.54)>C1A0 (0.40)>C2A0(0.37)。与 C1A0 相比，C1A1 和 C1A2 的土壤质量指数分别显著增加 70.83% 和 40.83%；与 C2A0 相比，C2A1 和 C2A2 的土壤质量指数分别显著增加 71.44% 和 43.77%，可见 C1A1、C2A1 提升土壤质量指数的效果最为显著，但两者间差异不显



(图中不同小写字母表示同一作物不同处理间差异显著($P<0.05$))

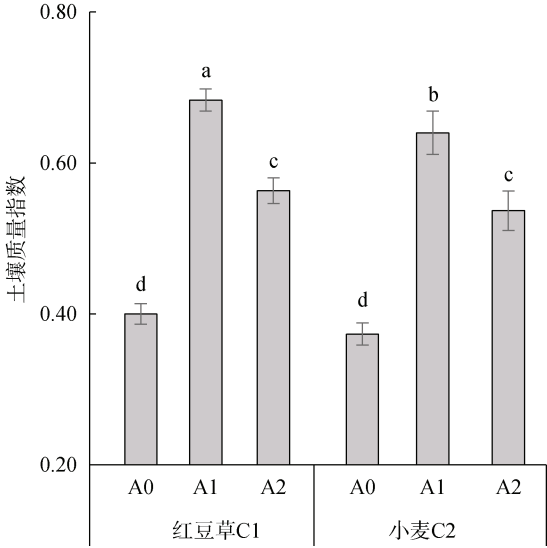
图 1 不同处理组合下作物地上部生物量和籽粒产量

Fig.1 Crop aboveground biomass and grain yields under different treatments

表 7 土壤质量评价指标公因子方差和权重(2022 年和 2023 年均值)

Table 7 Common factor variances and weights of soil quality evaluation indicators(average for 2022 and 2023)

序号	指标	公因子方差	权重
1	pH	0.922	0.064
2	水溶性盐	0.928	0.065
3	容重	0.951	0.066
4	有机质	0.868	0.061
5	全氮	0.964	0.067
6	硝态氮	0.956	0.067
7	铵态氮	0.945	0.066
8	有效磷	0.953	0.067
9	速效钾	0.801	0.056
10	蔗糖酶	0.981	0.069
11	脲酶	0.680	0.048
12	过氧化氢酶	0.952	0.067
13	碱性磷酸酶	0.683	0.048
14	微生物生物量碳	0.847	0.059
15	微生物生物量氮	0.969	0.068
16	微生物生物量 C/N 比	0.910	0.064



(图中不同小写字母表示不同作物及处理间差异显著($P<0.05$))

图 2 不同处理下土壤质量指数(2022 年和 2023 年均值)

Fig. 2 Soil quality index under different treatments (average for 2022 and 2023)

著。此外，线性回归分析结果(图 3)表明，SQI 分别与红豆草地上部生物量($R^2=0.9224$)、小麦地上部生物量($R^2=0.9522$)和小麦籽粒产量($R^2=0.9415$)均呈显著正相关关系($P<0.01$)。

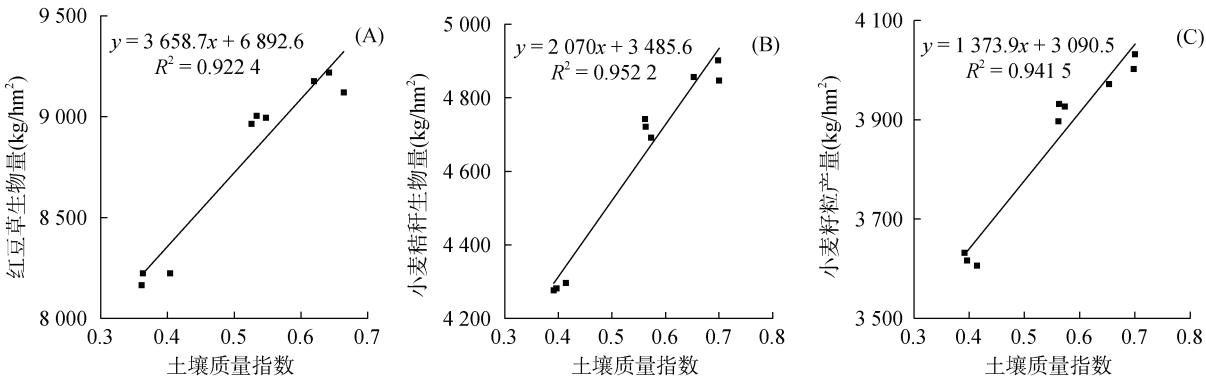


图 3 土壤质量指数与红豆草和小麦地上部生物量和籽粒产量关系

Fig.3 Relationship between SQI with aboveground biomass and grain yields of *Sainfoin* and wheat

3 讨论

3.1 木本泥炭和脱硫石膏改善土壤物理性质

生物炭和脱硫石膏是目前较常用的盐碱土壤改良剂^[17]。本研究为期 2 年的连续试验结果表明，施用木本泥炭和脱硫石膏均能显著降低耕层土壤 pH(降低 0.11~0.10 单位)、水溶性盐含量(降低 10.66%~9.74%)和容重(降低 6.99%~7.53%)，有效改善土壤物理性状。赵旭等^[18]研究发现，添加木本泥炭可降低土壤容重，优化土壤团聚结构、提高孔隙度，进而提

升土壤通气透水性与持水能力；王丹等^[19]研究结果表明，施用脱硫石膏配施有机物料可降低耕层土壤 pH、碱化度及电导率。本试验研究结论与上述研究结论相一致。主要是木本泥炭富含腐殖质，纤维素丰富、疏松多孔，孔隙结构优良对土壤有一定稀释作用^[20]，其比脱硫石膏更能降低土壤容重，促进土壤物理性质改善；同时，木本泥炭和脱硫石膏自身含有高凝聚性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子，可以促进盐碱土中胶体的絮凝和团聚体的形成^[21]，促进土壤结构改善，降低土壤 pH、水溶性盐含量，增加渗透性，促使土

壤物理指标良性发展^[22]。

3.2 木本泥炭和脱硫石膏提升土壤养分含量和肥力

氮、磷、钾是作物生长发育不可或缺的必需营养元素,土壤有机碳及速效养分含量是衡量土壤肥力水平的重要指标^[23]。单一研究土壤全量养分并不能全面反映土壤耕层肥力的真实状况,应该综合考虑与土壤肥力水平密切相关及植物可吸收利用的土壤有效态养分^[8]。兰州新区盐碱土壤受盐碱胁迫,土壤结构差,微生物活性及酶活性偏低,不利于土壤有机碳形成和养分的运移转化。生物质炭^[24]和脱硫石膏^[25]能够直接或间接地调控盐碱土养分含量。本研究为期2年的试验结果表明,施用木本泥炭和脱硫石膏均能不同程度促进土壤有机质、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量提升。这与宿翠翠等^[8]、田荣荣等^[17]的研究结果基本一致。究其原因可能是,施用木本泥炭和脱硫石膏改善了土壤物理性质,增强了土壤微生物活性,进而促进矿物质和有机质的分解,加速土壤养分的分解和有效养分元素的释放,提高了土壤有效养分含量;另一方面,施用木本泥炭和有机物料自身有机养分含量较高,施入土壤后会提高土壤有机质和养分含量^[26]。

3.3 木本泥炭和脱硫石膏提高土壤酶活性和微生物生物量碳氮

土壤微生物是土壤酶的主要来源,而酶活性直接关系到微生物对土壤中各类化学反应的调控程度^[27]。土壤微生物生物量碳、氮是评价土壤养分有效性和微生物结构随环境变化的敏感指标^[28]。本研究结果表明,土壤改良剂木本泥炭和脱硫石膏均能有效提高耕层土壤酶活性和提高土壤微生物生物量碳、氮含量,且木本泥炭改善效果优于脱硫石膏。李平等^[29]研究表明,施用土壤改良剂显著提高了土壤酶活性,且酶活性与碱解氮、有效磷和速效钾含量均呈显著正相关;袁访等^[30]研究结果发现,添加生物炭可通过提高土壤有机碳、碱解氮、速效磷含量,间接提升土壤过氧化氢酶和磷酸酶活性;陈凤清等^[31]研究表明,施用脱硫石膏能够提高燕麦根际土壤的酶活性。本研究结果与前述研究结论一致。其原因可能是木本泥炭、脱硫石膏配施有机物料有效改善了土壤物理性状,推动土壤各项指标向良性方向发展,为土壤酶促反应创造了更适宜的环境条件,进而显著提升酶活性;另一方面,木本泥炭、脱硫石膏及配施的有机物料自身含有各种养分元素、有机质为土壤微生物的生命活动提供了丰富的营养来源,为土壤微生物生存奠定了良好的养分环境,促使微生物

物生长和繁殖速度加快,土壤微生物生物量碳氮含量增加,酶活性增强^[32]。

3.4 木本泥炭和脱硫石膏对土壤质量和作物生物量和产量的协同提升

通过全数据(2022和2023年16个指标数据均值)对耕作层(0~30 cm)土壤质量指数进行主成分分析(表7),揭示木本泥炭和脱硫石膏施用对兰州新区盐碱土改良综合效应,结果显示,木本泥炭和A2脱硫石膏均提升了土壤质量指数(见图2),且土壤质量指数由高至低依次为:C1A1(0.68)>C2A1(0.64)>C1A2(0.56)>C2A2(0.54)>C1A0(0.40)>C2A0(0.37),表明,与传统施肥配施木本泥炭和脱硫石膏能够显著提高两种作物的地上生物量和小麦的产量,且木本泥炭效果更佳。土壤质量指数与红豆草秸秆生物量($R^2=0.9224$)、小麦秸秆生物量($R^2=0.9522$)和小麦籽粒产量($R^2=0.9415$)均呈显著正相关关系($P<0.01$,图3),土壤质量指数的提升能够显著提升作物生产潜力,进一步印证了土壤改良措施对作物产能的积极调控作用,这与Chang等^[15]、田荣荣等^[17]研究结果基本一致。这表明改良剂施用通过改善土壤理化性质,提高土壤养分含量,酶活性、微生物生物量碳氮及优化C/N比,进而提高了土壤质量,为作物增产奠定了良好的土壤环境。

需要指出的是,本研究中木本泥炭和脱硫石膏仅各设置1个施用剂量(木本泥炭9.0 t/hm²,脱硫石膏7.5 t/hm²),而实际生产中木本泥炭的适宜施用剂量,需结合区域内土壤实际肥力状况,进一步系统开展木本泥炭用量梯度试验,为其在盐碱土改良中的合理应用提供理论依据。

4 结论

连续2年大田试验及16项土壤指标综合数据分析表明,红豆草和小麦传统施肥配施木本泥炭和脱硫石膏有助于降低兰州新区盐碱地耕层土壤容重、pH和水溶性盐含量,提高养分含量,提升土壤酶活性,提高微生物生物量碳氮和优化微生物生物量C/N比,进而可改善耕层土壤微环境和土壤质量,为作物生长发育、高产奠定良好的土壤环境。比较而言,配施木本泥炭的改土增产效果最佳,可在兰州新区盐碱土改良中推广应用。

参考文献:

- [1] 胡炎,杨帆,杨宁,等.盐碱地资源分析及利用研究展望[J].土壤通报,2023,54(2):489-494.

- [2] 李建承, 王奉军, 柴宗越, 等. 兰州新区土壤盐碱化治理与生态保护机制研究[J]. 农村经济与科技, 2022, 33(12): 13–15.
- [3] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10–27.
- [4] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 不同改良剂对河套灌区土壤盐碱指标及作物产量的影响研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1172–1179.
- [5] Mailapalli D R, Thompson A M. Polyacrylamide coated Milorganite™ and gypsum for controlling sediment and phosphorus loads[J]. Agricultural Water Management, 2011, 101(1): 27–34.
- [6] Zhang Y, Yang J S, Yao R J, et al. Short-term effects of biochar and gypsum on soil hydraulic properties and sodicity in a saline-alkali soil[J]. Pedosphere, 2020, 30(5): 694–702.
- [7] 赵永敢, 王淑娟, 李彦, 等. 脱硫石膏改良盐碱土技术发展历程与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(4): 735–745.
- [8] 宿翠翠, 周彦芳, 施志国, 等. 不同施肥方式与保水剂互作对河西地区黄芪土壤微环境及产量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 94–103.
- [9] 周谈坛, 李丹丹, 邱丽丽, 等. 不同配施比例下秸秆和木本泥炭对快速提升土壤有机质和作物产量的耦合影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1699–1711.
- [10] 马志伟, 张丛志, 赵占辉, 等. 基于木本泥炭的土壤健康培育研究进展[J]. 生态环境学报, 2024, 33(12): 1964–1977.
- [11] Omari R A, Aung H P, Hou M D, et al. Influence of different plant materials in combination with chicken manure on soil carbon and nitrogen contents and vegetable yield[J]. Pedosphere, 2016, 26(4): 510–521.
- [12] 沈其荣, 徐志辉, 解继驭. 一种生物活化木质泥炭中腐殖酸的方法及制备的生物有机肥: CN110229039A[P]. 2019-09-13.
- [13] Rutigliano F A, Romano M, Marzaioli R, et al. Effect of biochar addition on soil microbial community in a wheat crop[J]. European Journal of Soil Biology, 2014, 60: 9–15.
- [14] 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, 2000.
- [15] Chang F D, Zhang H Y, Song J S, et al. Once-middle amount of straw interlayer enhances saline soil quality and sunflower yield in semi-arid regions of China: Evidence from a four-year experiment[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344: 118530.
- [16] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 265–273.
- [17] 田荣荣, 王淑娟, 刘嘉, 等. 根区施用生物炭和脱硫石膏提高盐碱土壤质量及向日葵产量[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 148–157.
- [18] 赵旭, 樊军, 王茜, 等. 添加木本泥炭和膨润土对侵蚀退化黑土理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 953–963.
- [19] 王丹, 黄超, 李小东, 等. 脱硫石膏配施不同量有机物料对盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 34–40.
- [20] 李秋霞, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物质炭对旱地红壤理化性状和作物产量的持续效应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 208–213, 261.
- [21] Zhao Y G, Zhang W C, Wang S J, et al. Effects of soil moisture on the reclamation of sodic soil by flue gas desulfurization gypsum[J]. Geoderma, 2020, 375: 114485.
- [22] 魏盈, 焦乐, 张鹏, 等. 生物炭改良盐碱地研究与应用进展[J]. 环境科学, 2024, 45(2): 940–951.
- [23] 李慧敏, 田胜营, 李丹丹, 等. 有机物料施用对潮土活性有机碳及微生物群落组成的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 777–787.
- [24] Li Y F, Li G H. Mechanisms of straw biochar's improvement of phosphorus bioavailability in soda saline-alkali soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(32): 47867–47872.
- [25] Zhang W C, Zhao Y G, Wang S J, et al. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) and maize (*Zea mays* L.) can grow directly in flue gas desulfurization gypsum[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20(4): 2042–2047.
- [26] 高博涵, 马长林, 王艳玲. 一年施与两年连施生物炭对稻田土壤磷素稳定性及有效性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(10): 1337–1347.
- [27] 任立军, 李金, 邹洪涛, 等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. 土壤, 2023, 55(4): 756–763.
- [28] Liang B, Yang X Y, He X H, et al. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(2): 121–128.
- [29] 李平, 聂浩, 郎漫, 等. 几种土壤结构改良剂对重金属污染土壤养分有效性及酶活性的影响[J]. 环境科学研究, 2025, 38(3): 599–609.
- [30] 袁访, 李开钰, 杨慧, 等. 生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4655–4661.
- [31] 陈凤清, 丛建民, 许清涛, 等. 脱硫石膏改良对吉林西部碱土酶活性的影响研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(12): 151–156.
- [32] 何彦臻, 许世奇, 户可欣, 等. 腐熟羊粪添加微量元素对风沙土土壤微生物、酶活性和玉米产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(12): 1634–1643.

(责任编辑: 王方方)