

DOI: 10.11766/trxb202012110682

米美霞, 邵明安, 武小刚, 陈玉鹏. 煤矸石和钙结石对植物生长和土壤含水量的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1460–1471

MI Meixia, SHAO Ming'an, WU Xiaogang, CHEN Yupeng. The Effects of Coal Gangues and Caliche Nodules on Plant Growth and Soil Moisture [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1460–1471.

煤矸石和钙结石对植物生长和土壤含水量的影响*

米美霞¹, 邵明安^{2,3†}, 武小刚¹, 陈玉鹏¹

(1. 山西农业大学城乡建设学院, 山西太谷 030801; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 确定煤矸石和钙结石对植物生长和土壤水分变化的影响, 是准确量化黄土高原地区土壤含水量和科学制定植被恢复策略的基础。通过小区试验实现, 将土壤分别与煤矸石和钙结石混合后(碎石含量为 300 g·kg⁻¹) 填装至 2 m³ 的地下小区中, 以不含碎石土壤为对照, 种植柠条 (*Caragana Korshinskii* Kom.) 和苜蓿 (*Medicago sativa*), 定期观测植物生长指标和含水量。研究表明: (1) 煤矸石对植物生长具有抑制作用, 钙结石则无显著影响。含煤矸石土壤中柠条和苜蓿累积生物量较无碎石土壤中分别低 47% 和 21%, 较含钙结石土壤中分别低 45% 和 24%。苜蓿对含煤矸石土壤的适应性优于柠条。(2) 介质类型对土壤含水量变化的影响较植物类型更为显著, 含煤矸石土壤含水量显著高于其他两种介质, 30~50 cm 土层深度差异更显著。(3) 柠条小区中, 含煤矸石土壤与钙结石土壤中蒸散量的差值分别占土壤平均储水量的 12% 和 23%。苜蓿小区中, 含煤矸石、钙结石土壤与无碎石土壤中蒸散量的差值分别占土壤平均储水量的 -11% 和 11%。可见, 煤矸石和钙结石对土壤水分损失的抑制作用不同, 随植物种类而变化。在预测区域土壤含水量时, 煤矸石和钙结石对含水量的影响不可忽略, 尤其在植被生长条件下。

关键词: 碎石; 植物生物量; 土壤水分; 黄土高原

中图分类号: S152.7⁺5 文献标志码: A

The Effects of Coal Gangues and Caliche Nodules on Plant Growth and Soil Moisture

MI Meixia¹, SHAO Ming'an^{2,3†}, WU Xiaogang¹, CHEN Yupeng¹

(1. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 Plot tests were designed to study the effects of coal gangues and caliche nodules on the characteristics of

* 国家自然科学基金项目 (41907012)、山西农业大学科技创新基金项目 (2017YJ02, 2017ZZ12) 和山西省高等学校科技创新项目 (2020L0169) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41907012), the Scientific and Technological Innovation Programs of Shanxi Agricultural University of China (Nos. 2017YJ02 and 2017ZZ12) and the Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi Province of China (No. 2020L0169)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 米美霞 (1986—), 女, 陕西榆林人, 博士, 讲师, 主要从事土壤物理与水文生态研究。E-mail: meixiami@126.com

收稿日期: 2020-12-11; 收到修改稿日期: 2021-04-03; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-07-07

plant growth and soil water content on the Loess Plateau. This study was important for accurate quantification of soil water content and scientifically formulating vegetation restoration strategies. 【Method】 *Caragana* (*Caragana korshinskii* Kom.) and *Alfalfa* (*Medicago sativa*.) were planted in 2 m³ experimental plots underground, containing reconstituted soil, made up of the fine earth and either coal gangues or caliche nodules (300 g·kg⁻¹) under natural climate conditions. The water content and plant growth were regularly observed. 【Result】 The results showed that coal gangues negatively affected plant development and quality, while caliche nodules had no significant effect. The accumulative aboveground biomass of *Caragana* and *Alfalfa* in the soil containing coal gangues was 47% and 21% lower than that in the fine earth, respectively. Also, the accumulative aboveground biomass of *Caragana* and *Alfalfa* in the soil containing coal gangues was 45% and 24% lower than that in the soil containing caliche nodules, respectively. Therefore, the adaptability of *Alfalfa* to the soil containing coal gangues was better than that of *Caragana*. Plant species had weak effects on soil water content when compared to the media types. The water content of the soil with coal gangues was significantly higher than that of the other two media. The differences in the water content between medium types were the largest at a depth of 30 to 50 cm. When *Caragana* was planted, the differences of evapotranspiration between soils containing coal gangues and caliche nodules, and between soils containing coal gangues and the fine earth accounted for about 12% and 23% of the average water storage of the fine earth, respectively. Also, when *Alfalfa* was planted, the differences of evapotranspiration between soils containing coal gangues and caliche nodules, and between soils containing coal gangues and fine earth accounted for -11% and 11% of the average water storage of the fine earth, respectively. Importantly, the inhibiting effects of coal gangue and caliche nodules on soil water loss were different and varied with plant species. 【Conclusion】 In conclusion, we observed that the importance of coal gangues and caliche nodules cannot be ignored when predicting soil water content, especially under vegetation coverage.

Key words: Rock fragments; Plant biomass; Soil water; The Loess Plateau

含煤矸石土壤和含钙结石土壤是黄土高原两种重要的立地类型。煤矸石是采煤、洗煤过程中产生的固体废弃物, 钙结石是土壤中碳酸钙长期淋溶、淀积和干湿交替作用下形成的钙质结核。土壤中煤矸石和钙结石的存在影响入渗、蒸发、溶质运移等水文过程。Zhou 等^[1-2]研究表明, 煤矸石和钙结石对土壤水分入渗均具有阻碍作用: 随煤矸石含量的增加, 入渗速率和弥散系数均减小; 钙结石含量小于 40%, 入渗速率和弥散系数随碎石含量增加而减小, 超过 40% 则有增加的趋势。甄庆等^[3]也得出土石混合结构入渗小于黄土, 含煤矸石土壤中入渗锋深度、累积入渗均大于含钙结石土壤。在总水分条件一致的情况下, 两种碎石均具有抑制土壤蒸发的作用: 煤矸石含量由 15% 增加至 75%, 累积蒸发减小比例由 5% 增加至 23%; 钙结石含量由 10% 增加至 50%, 累积蒸发减小比例由 14% 增加至 21%^[4-5]。碎石对蒸发的影响与水分条件有关, 早有研究^[6-7]表明, 初始湿润条件下碎石的存在抑制土壤蒸发, 但初始干燥条件下则促进蒸发。植被生长条件下, 碎石对植物吸水过程亦具有显著影响。Tétégan 等^[8]通过室内盆栽试验证实耗水过程中碎

石含水量开始减小的时间滞后于土壤, 植物可直接利用碎石中的水分, 尤其是高碎石含量 (40%) 土壤。Korboulewsky 等^[9]进一步研究发现, 土壤中多孔碎石能够缓解植物水分胁迫, 无孔碎石无此特征。Ceacero 等^[10]最新研究发现, 地中海气候条件下碎石对土壤水分时空动态变化和水分利用效率的影响大于传统耕作管理。

煤矸石的存在对植物生长有重金属毒害的风险, 毒害作用大小受物种、植物生长期和植物年龄影响, 学者们特别关注煤矸石填埋造成的负效应^[11-12], 而对其影响植物生长后造成土壤水分动态变化的研究较少。含钙结石土壤中植物生长与钙结石含量有关, 高钙结石含量 (50%) 对植物生长亦具有负效应^[13]。一定碎石含量条件下, 煤矸石和钙结石对植物生长特征的影响是否存在差异尚需进一步研究。黄土高原地区水分是植物生长的主要限制因素, 含煤矸石和钙结石土壤作为该区两种重要的立地类型, 其水分变化特征尚不清楚。明确此两种立地条件下水分变化特征及其差异性, 是进行区域水分管理和植被建设的依据, 也是预测黄土高原土壤水分变化、明确该区水分循环特征的基础。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

土壤、钙结石均取自黄土高原北部的六道沟流域(38°46' N~38°51' N, 110°21' E~110°23' E; 海拔1 081~1 274 m),煤矸石取自于六道沟煤矿周围。六道沟流域位于陕西神木县以西14 km处,地处半干旱气候区,多年日平均气温为8.6 °C,≥10 °C年积温3 232 °C,1996—2015年年均降水量为412 mm。2015年和2014年每日降水和气温如图1所示,年平均降水量分别为405.0和422.3 mm,年内日平均气温分别为9.7 °C和9.6 °C。该区降水多发生在7—9月,每年无霜期约为169 d,平均年水面蒸发量为785 mm。该区以风积黄土为主,土壤pH8.5~8.8,平均砂粒、粉粒和黏粒含量分别为72.9%、17.8%和9.3%(体积分数),为砂壤土(国际制),土壤中钙结石丰富。该区主要植物有长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*.)等。

1.2 试验布设

本研究通过小区模拟试验实现。设计煤矸石和钙结石的含量均为300 g·kg⁻¹与土壤均匀混合后填装,填装体积约为2 m³,无碎石土壤为对照,选择研究区两种典型植物——灌木柠条和草本植物苜蓿为供试植物。共六个处理,可表示为无碎石土壤+柠条(SKP)、含煤矸石土壤+柠条(GKP)、含钙结石土壤+柠条(CKP)、无碎石土壤+苜蓿(SPA)、含煤矸石土壤+苜蓿(GPA)、含钙结石土壤+苜蓿(CPA),设置3次重复,共建立模拟小区18个(3介质×2植物×3重复),规格为2 m×1 m×1 m(长×宽×深)。在六道沟流域内约为80 m²的一处平地建造试验小区。除草和整平地面后,按照设计的规格测量,小区之间距离为10 cm,分为两排,各处理小区随机排列。随后将1 m深度土壤挖出,堆放至周围晾晒。晾晒期间建造小区,小区四周为砖砌墙壁,砌好之后用水泥抹墙,中间两两小区共用一面墙壁,填装之前四周铺上防水隔层,防止水分侧渗,墙体厚度为10 cm。小区规格及填装详见图2。

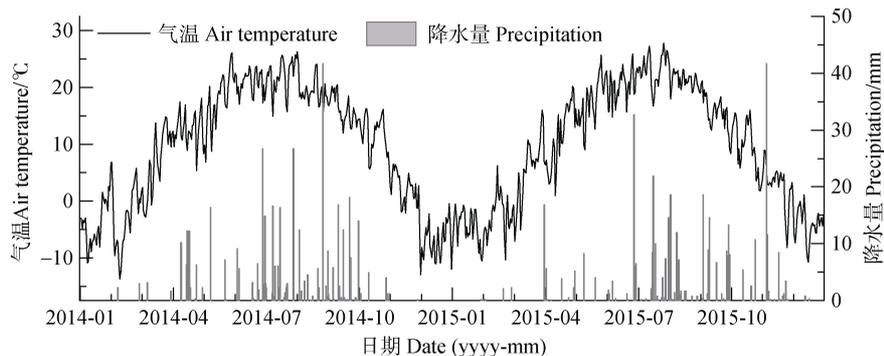


图1 2014年和2015年降水和气温随时间变化

Fig. 1 Daily rainfall and mean air temperature during 2014-2015

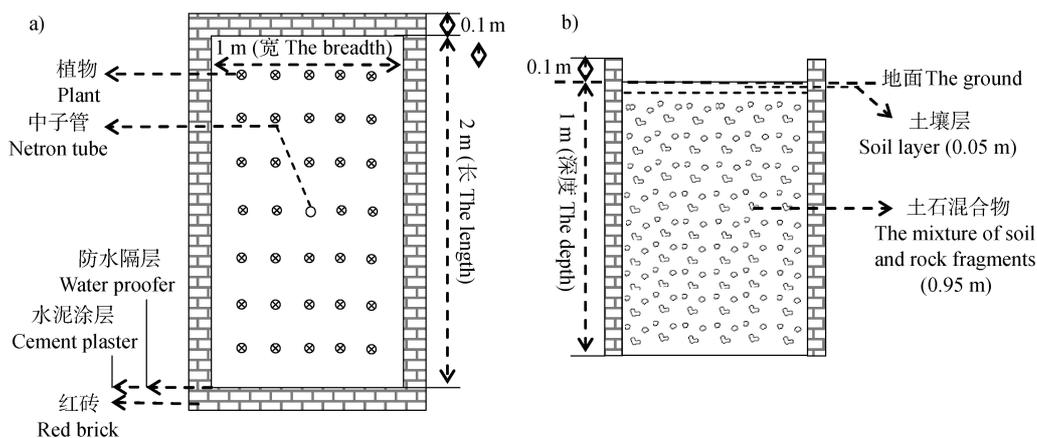


图2 单个试验小区规格及布设(a为平面示意图,b为剖面示意图)

Fig. 2 The size and layout of a test plot (a is a schematic plan layout, b is a schematic sectional drawing)

填装前, 分别测定煤矸石和钙结石的基本物理性质, 结果见表 1。煤矸石中 2~10 mm 粒径为主, 其次为 10~20 mm。钙结石中以 20~30 mm (>500 g·kg⁻¹) 粒径为主, 其次为大于 40 mm, 10~40 mm 大小的钙结石含量约 700 g·kg⁻¹。Gong 等^[14]研究表明, 该区钙结石以粒径范围 10~50 mm 为主, 覆盖度超过三分之二。因此, 本研究所用钙结石基本符合研究区实际情况。根据容重和饱和含水量可判断

煤矸石孔隙度和持水容量大于钙结石。将土壤或土石混合物称量、混合、分层回填至小区内, 控制土壤容重为 1 400 kg·m⁻³, 填装深度为 0.95 m, 表层覆盖 5 cm 土壤层, 利于播种。填装过程中在小区中央安装 1 m 深的中子管, 用于水分的连续定位监测。

2014 年 4 月初进行植物播种, 柠条种植密度为每小区 34 株, 苜蓿为每小区 34 丛 (图 2a)。株或丛之间横向距离为 20 cm, 纵向距离为 25 cm。

表 1 煤矸石和钙结石物理性质

Table 1 Physical properties of coal gangues and caliche nodules samples

碎石类型 Type of rock fragments	粒径范围 /mm	各粒径范围质量百分比 The mass proportion in every particle size/%	形状 The shape	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	饱和含水量 Saturation water content/ (m ³ ·m ⁻³)	样品干物质量 The dry mass of samples/kg
煤矸石 Coal gangues	2~10	37.7	块状/片状	1.73	0.178	13.60
	10~20	26.1	Flake/block			
	20~30	13.7				
	30~40	11.8				
	>40	10.6				
钙结石 Caliche nodules	2~10	2.15	块状/椭圆	2.05	0.160	12.09
	10~20	6.69	Block/ellipse			
	20~30	52.92				
	30~40	11.38				
	>40	26.86				

1.3 测定项目与方法

1.3.1 含水量测定方法 中子法 (CNC503DR, 中子仪, 北京) 测定土壤和土石混合介质含水量, 测定时间为 2014 年 6—10 月和 2015 年 4—10 月。每 1~2 周测定一次, 至 2015 年 10 月共测定 34 次。中子仪测定水分标定结果受土壤质地、介质组成、容重等因素影响, 因此需对含煤矸石和钙结石土壤进行专门的标定。待小区自然沉降 2 周后, 挖掘法测定 0~20、20~30、30~40、40~50 cm 四个层次土壤和煤矸石/钙结石质量含水量, 取样容积约 200 cm³。根据式 (1) 计算得到含碎石土壤含水量。

$$\theta_{mT} = R_m \theta_{mrf} + (1 - R_m) \theta_{ms} \quad (1)$$

式中, θ_{mT} 代表含碎石土壤质量含水量, g·g⁻¹; θ_{mrf} 代表煤矸石/钙结石质量含水量, g·g⁻¹; θ_{ms} 代表土壤

质量含水量, g·g⁻¹; R_m 代表煤矸石/钙结石含量, 本研究中为 300 g·kg⁻¹。根据容重和质量含水量估算得到容积含水量。中子仪 20 cm 处的测定值对应 0~20 cm 与 20~30 cm 两个层次平均含水量, 30 cm 处的测定值对应 20~30 cm 与 30~40 cm 两个层次平均含水量, 40 cm 处测定值以此类推。标定结果如下:

$$\theta_{vs} = 0.6715CR_s + 0.0230, R^2 = 0.96 \quad (2)$$

$$\theta_{vg} = 0.56666CR_g + 0.0071, R^2 = 0.93 \quad (3)$$

$$\theta_{vc} = 0.6051CR_c + 0.0209, R^2 = 0.94 \quad (4)$$

式中, θ_{vs} 、 θ_{vg} 和 θ_{vc} 分别代表土壤、含煤矸石土壤、含钙结石土壤中的容积含水量, cm³·cm⁻³; CR_s 、 CR_g 和 CR_c 分别代表三种介质中中子计数比, 为中子仪读数与标准计数的比值。中子法测定时表层有中子外

溢, 底层有土石混合物与下部土壤层次的过渡层。因此, 测定深度从 20 cm 开始, 20 cm 深度以下每 10 cm 测定一次, 测定深度至 80 cm。

1.3.2 植物生长指标测定 从 2014 年 7 月开始每月测定 1~2 次株高、基径(灌)、叶面积指数和覆盖度。株高用不锈钢尺测定, 精度为 0.1 cm。柠条基径用游标卡尺测定, 精度为 0.01 mm。每个柠条小区选择 6 株能够代表小区中平均生长状况的植株作为样株, 做好标记。叶面积指数用植物冠层分析仪(LAI 2200c, LI-COR Inc., 美国)于测定日期当天 18:00 左右测定。覆盖度测定时首先用数码相机(DSC hx1, 索尼)距离地面 1.5 m 垂直于地面拍照, 然后用 Image-Pro Plus 6.0 软件处理(Media Cybernetics, Inc., 美国)。为确保研究期间植物不被破坏, 柠条生物量通过植物异形生长公式^[15]模拟得到:

$$\ln(B) = a \ln(D^2 H) + b \quad (5)$$

式中, 字母 a 和 b 为经验参数, 通过模拟得到; B 代表植物地上部分生物量, g ; H 和 D 分别代表株高 (cm) 和基径 (mm)。本研究中 a 和 b 两个经验参数通过实测 106 株柠条株高、基径和生物量, 并分析其关系得到 ($a = 0.94$, $b = -4.79$, $R^2 = 0.98$, 标准误为 0.20)。柠条小区 6 株样株生物量的平均值乘以本小区株数代表每小区柠条地上部生物量。根据苜蓿生长特征, 每年开花两次, 一次为 8 月, 一次为 10 月, 每年收割两次, 两茬生物量加和即为当年累积生物量。

1.3.3 其他指标 土壤颗粒组成使用马尔文激光粒度仪 (MS-2000, Malvern Inc., 英国) 测定; 煤矸石/钙结石尺寸通过筛分法测定; 容重通过排水法测定; 饱和含水量通过浸泡 96 h 后称重、烘干测定。降水量通过直径为 20 cm 的标准雨量桶测定, 气温数据来源为神木侵蚀与环境试验站气象站。

1.4 数据分析

1.4.1 数据分析方法 介质类型和植物种类对含水量的影响及二者交互作用、二者与季节变化和植物种类的交互作用通过多因素方差分析进行; 含水量为自变量, 介质类型、植物种类、土层深度和季节作为固定因子。深度为 20、30、40、50、60、70 和 80 cm 7 个深度, 季节为 4 月、5 月、6 月、7 月、8 月、9 月和 10 月 7 个月份, 为 2014、2015 年两年对应月份平均值, 其中 4 月和 5 月为 2015 年测定结果。介

质类型和植物种类对土壤储水量变化值和蒸散量的影响及二者交互作用亦采用多因素方差分析进行。最小显著差异 (LSD) 法进行多重比较, 在 95% 置信区间内进行。通过 Excel 2010 软件进行数据储存和处理, SPSS 23.0 软件进行统计分析和方差分析。

1.4.2 储水量变化值和蒸散量的计算 0~80 cm 月平均储水量 W (mm) 通过含水量和土层深度来计算:

$$W = 10D\bar{\theta}_v \quad (6)$$

式中, 常数 10 为 cm 向 mm 转化系数; D 为土层深度, cm, 本研究中为 80; $\bar{\theta}_v$ 为各深度含水量平均值, 代表 0~80 cm 土层中平均含水量, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。每月各次测定的含水量平均值代表本月含水量。通过计算可得到 2014 年 6—10 月 5 个月、2015 年 4—10 月 7 个月各月平均储水量。每月平均储水量与 2014 年 6 月平均储水量的差值 (ΔW) 代表各月储水量相对于研究初期储水量的变化情况, 依次可表示为 ΔW_1 、 ΔW_2 、……、 ΔW_{11} (mm) 来表示, 对应的时间可表示为 T_1 、 T_2 、……、 T_{11} 。通过水量平衡计算蒸散量 (ET, mm)。本研究试验场地为平地, 无地表径流; 植株幼小, 冠层截留很小, 可忽略; 因此, 进入每个小区中降水量 (P , mm) 一致。若忽略深层渗漏, 蒸散量计算公式为:

$$ET = P - \Delta W \quad (7)$$

2 结果

2.1 不同介质类型对植物生长的影响

煤矸石对植物生长的影响显著, 钙结石对植物生长无显著影响。含煤矸石土壤中植物株高、基径、生物量、叶面积指数和覆盖度均显著小于对照土壤和含钙结石土壤 (表 2)。至 2015 年 10 月, 含煤矸石土壤中柠条和苜蓿累积生物量较对照土壤中分别低 47% 和 21%, 较含钙结石土壤分别低 45% 和 24%。煤矸石对植物生长的抑制作用随植物年龄和种类变化。2014 年对照土壤、含煤矸石土壤、含钙结石土壤中柠条地上部生物量分别为 168.1、78.4 和 171.6 g, 苜蓿地上部生物量分别为 239.5、176.0 和 229.2 g。

2015 年三种介质中柠条地上部生物量(总生物量减去 2014 年生物量)分别为 305.1、174.6 和 284.4 g, 苜蓿地上部生物量分别为 146.0、153.8 和 168.6 g。2014 和 2015 年含煤矸石土壤中柠条地上部生物量较对照土壤中分别减小 53%和 43%; 2014 年含煤矸

石土壤中苜蓿地上部生物量较对照土壤中降低 26%, 2015 年则略大于对照土壤(5%)。可见煤矸石对 1 龄植物生长的抑制作用更为显著, 对苜蓿的抑制作用弱于柠条。此外, 2014 年柠条生物量高于苜蓿, 2015 年则反之, 反映了灌草生长特征的差异。

表 2 不同介质类型植物生长指标比较

Table 2 The comparison of plant growth indices in different media types

处理 Treatments	株高 Plant height/cm	基径 Basal diameter/mm	地上部生物量 Aboveground biomass/g	叶面积指数 Leaf area index/ (cm ² ·cm ⁻²)	覆盖度 Cover degree/ (cm ² ·cm ⁻²)
SKP	55.1±1.4a	6.86±0.50a	463.2±34.0a	0.75±0.20ab	0.63±0.00a
GKP	48.4±2.4b	5.27±0.35b	247.2±11.6b	0.56±0.12b	0.52±0.01b
CKP	58.8±3.4a	6.48±0.60a	446.3±17.9a	0.91±0.15a	0.62±0.03a
SPA	33.1±2.0a	-	385.4±11.8a	0.61±0.18a	0.56±0.05a
GPA	26.2±2.1a	-	303.8±5.9a	0.21±0.05b	0.52±0.04a
CPA	31.2±2.9a	-	397.8±25.9a	0.43±0.02ab	0.58±0.01a

注: SKP、GKP、CKP、SPA、GPA 和 CPA 分别代表无碎石土壤+柠条、含煤矸石土壤+柠条、含钙结石土壤+柠条、无碎石土壤+苜蓿、含煤矸石土壤+苜蓿、含钙结石土壤+苜蓿六个处理(下同)。地上部生物量为累积生物量, 其他均为研究期内最大值; 同一植物同一列中数字后面不同小写字母代表在 0.05 水平差异显著。Note: SKP, GKP, CKP, SPA, GPA and CPA were the six treatments represented as the fine earth + Caragana, the soil containing coal gangues + Caragana, the soil containing caliche nodules + Caragana, the fine earth + Alfalfa, the soil containing coal gangues + Alfalfa, the soil containing caliche nodules + Alfalfa, respectively (the same below). All the plant indexes were the maximum value in the study period, but the aboveground biomass was accumulated. Different letters in the same column for the same plant indicated that the difference was significant at 0.05 level.

2.2 土壤含水量变化及其影响因素

2.2.1 土壤含水量时空(垂直)动态变化

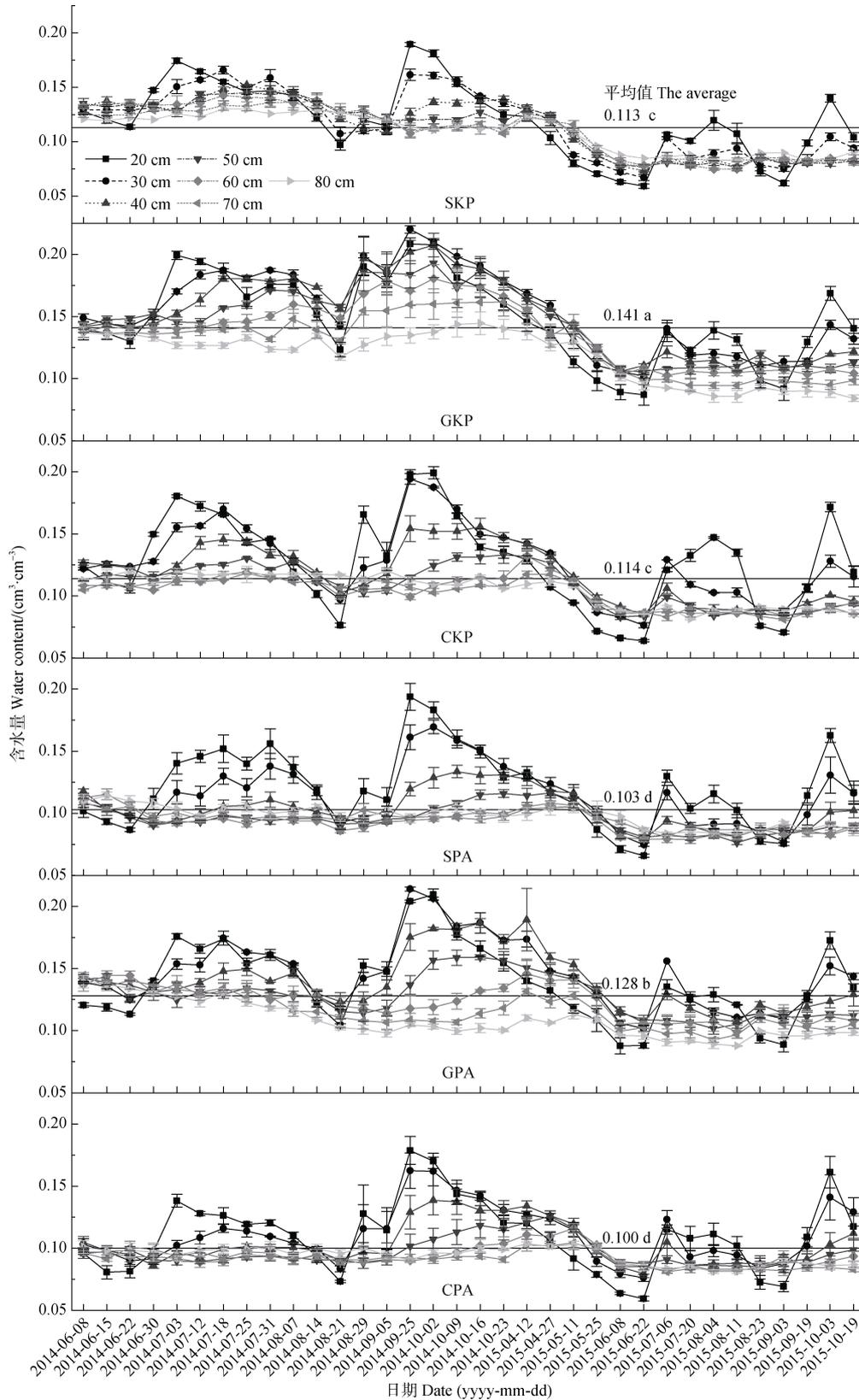
含水量动态变化可分为三个阶段(图 3): 4—6 月含水量随时间呈降低的趋势, 为水分消耗期。7 月开始含水量增加并相对稳定, 水分能够维持平衡。9 月底开始含水量增加, 降雨对土壤水分的补偿作用显著。4—6 月降雨较少, 气温逐渐升高, 加之植物耗水和土壤蒸发强烈, 土壤水分消耗大。7—9 月为雨季, 降雨补给量较大, 蒸散作用强烈, 因此至 9 月初含水量仍然较低。9 月底至 10 月, 植物进入慢速生长期或停止生长, 耗水减少, 气温逐渐降低, 进入水分补偿阶段。

含水量垂直变化规律随季节而变化: 4—6 月份和 9 月初, 表层含水量较低, 7 月、8 月和 10 月则表层含水量大于深层(图 3)。越靠近地表含水量变异性越强, 20 cm 与 30 cm 两个深度含水量随时间变化趋势基本一致, 变异系数分别为 22%~29%和 19%~25%(六个处理对应时间序列变异系数统计结果, 下列深度相同)。40 cm 和 50 cm 两个深度含水量变异系数分别为 15%~23%和 12%~23%,

60 cm、70 cm 和 80 cm 三个深度含水量变异系数分别 9%~21%、7%~19%和 7%~13%。越靠近表层, 土壤水分影响因素更为复杂, 更易随气候条件发生变化, 因此变异较强。含水量时空(垂直)动态变化与王建国等^[16]和郭忠升^[17]研究一致, 与研究区土壤水分时空变化的一般规律吻合。

2.2.2 介质类型对含水量的影响

介质类型、土层深度、季节和植物类型均对含水量具有极显著影响(表 3)。根据 F 值大小判断, 介质类型对含水量的影响较土层深度、季节变化和植物种类更为显著。介质类型仅与土层深度具有极显著的交互作用, 土层深度和植物种类均与季节具有极显著的交互作用。含煤矸石土壤中含水量显著高于含钙结石土壤和对照土壤, 含钙结石土壤中含水量与对照土壤含水量无显著差异(图 3)。除 80 cm 深度, 其他各深度含煤矸石土壤中含水量均显著高于其他两种介质。介质间含水量差值随着深度增加, 具有先增大后减小的趋势, 最大差值对应的深度位于 30~50 cm, 具体深度随介质和植物变化(图 4)。



注：不同处理平均值后面的小写字母不同代表在 95%置信区间内差异显著（单因素方差分析）。Note: Different letters after the average water content of every treatment indicated that the difference was significant at 0.05 level (One-way ANOVA).

图 3 不同处理各土层深度含水量随时间动态变化
Fig. 3 Water content at every depth change with time in different treatments

表 3 介质类型、土层深度、季节、植物种类对含水量的影响（多因素方差分析）

Table 3 Effects of media type, depth, season and plant type on water content (multi-factor ANOVA)

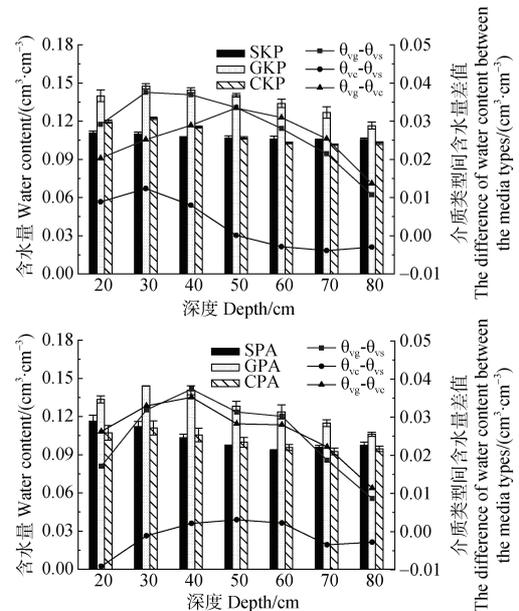
固定因子 Factors	df	F	P
介质类型 Media type	2	212.0	0.000
土层深度 Depth	6	25.20	0.000
季节 Season	6	33.42	0.000
植物种类 Plant type	1	61.47	0.000
介质类型×土层深度 Media type×Depth	12	3.10	0.000
介质类型×季节 Media type×Season	12	0.945	0.501
介质类型×植物种类 Media type×Plant type	2	0.609	0.544
土层深度×季节 Depth×Season	36	6.306	0.000
植物种类×土层深度 Plant type×Depth	6	0.710	0.642
植物种类×季节 Plant type×Season	6	4.739	0.000
介质类型×土层深度×季节 Media type×Depth×Season	72	0.145	1.000
介质类型×土层深度×植物种类 Media type×Depth×Plant type	12	0.725	0.728
介质类型×季节×植物种类 Media type×Season×Plant type	12	1.605	0.084
土层深度×季节×植物种类 Depth×Season×Plant type	36	0.467	0.997
介质类型×土层深度×季节×植物种类 Media type×Depth×Season×Plant type	72	0.124	1.000

注：df 为自由度；F：通过 F 统计进行显著性检验；P：F 统计得到的概率值。下同。Note: df: degree of freedom; F: F statistic used for significant tests; P: the probability associated with F statistic. The same below.

2.2.3 植物种类对含水量的影响 柠条小区各介质平均含水量均显著大于苜蓿小区，两种植物类型对含水量的影响亦随季节变化（图 3）。计算同一植物三种介质中平均含水量，4 月至 10 月柠条小区平均含水量高出苜蓿小区的百分比分别为 6.5%、-4.5%、10.6%、17.0%、15.8%、10.3%和 6.5%，其中 7 月和 8 月两种植物类型间含水量差异最大。由研究初期至末期，柠条小区与苜蓿小区含水量的差异逐渐减小，2014 年柠条小区平均含水量较苜蓿小区高 16%，2015 年则不到 1%。

2.3 不同介质类型下储水量变化值和蒸散量变化

各月平均储水量与 2014 年 6 月储水量的差值 (ΔW) 绘于图 5 (左)。柠条小区中，2015 年 4 月 (T_5) 之前 ΔW 由高到低依次为含煤矸石土壤、含钙结石土壤、对照土壤，含煤矸石土壤和含钙结石土壤中储水量均增加，而对照土壤中减小。在 T_5 之后，含煤矸石土壤中储水量开始减少，至 2015 年 6 月 (T_7) ΔW 转变为由高到低依次为含钙结石土壤、含煤矸石土壤、对照土壤。苜蓿小区中，随着时间推移，介质间储水量变化值的差异逐渐增



注： θ_{vs} 、 θ_{vg} 和 θ_{vc} 分别代表对照土壤、含煤矸石土壤、含钙结石土壤中的容积含水量。Note: θ_{vs} 、 θ_{vg} and θ_{vc} indicated the volumetric water content of the fine earth, soil containing coal gangues and soil containing caliche nodules, respectively.

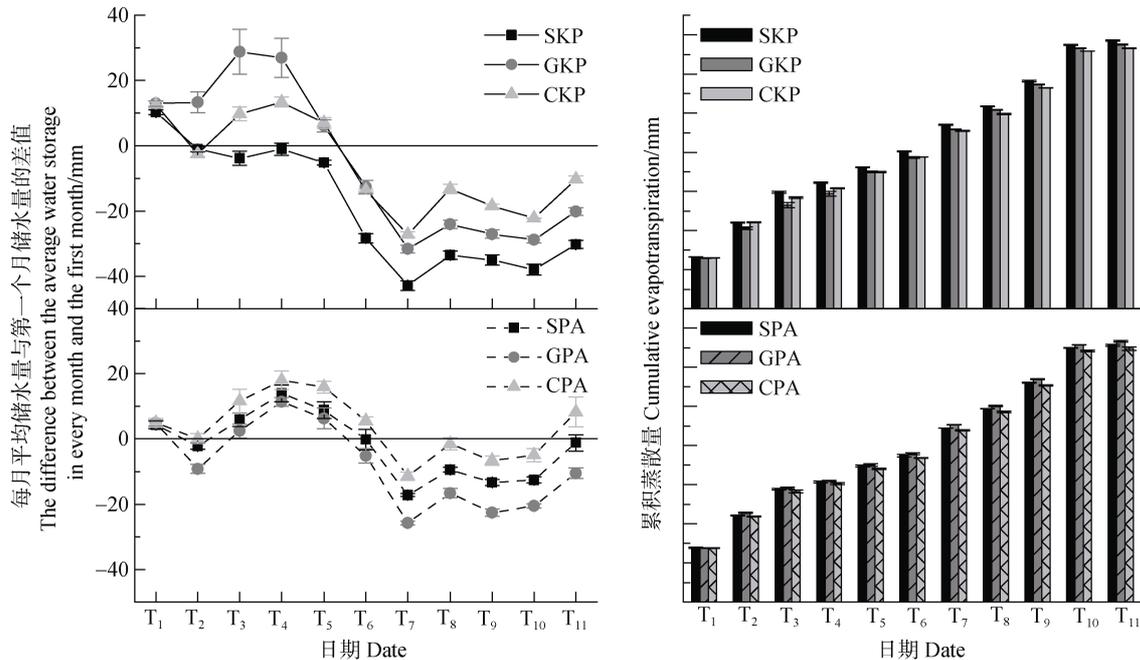
图 4 三种介质含水量及介质间含水量差值随深度变化
Fig. 4 The water content and its difference between the media types varied with depth

加, ΔW 由高到低顺序为含钙结石土壤、对照土壤、含煤矸石土壤。

至 2015 年 10 月 (T11) 柠条小区中土壤中储水量减少了 30 mm, 含煤矸石土壤中减少了 20 mm, 含钙结石土壤中减少了 10 mm。苜蓿小区中土壤储水量减少 1 mm, 含煤矸石土壤中减少 10 mm, 含钙结石土壤中储水量增加了 8 mm。降水一致的情况下, 忽略深层渗漏, 土壤储水量与蒸散量此消彼长。至研究末期, 柠条小区中, 对照土壤、

含煤矸石土壤和含钙结石土壤累积蒸散量分别为 686、676 和 666 mm; 苜蓿小区中, 对照土壤、含煤矸石土壤和含钙结石土壤累积蒸散量分别为 657、666 和 647 mm。

以介质类型和植物种类为变量, 对研究期间储水量变化值和蒸散量进行二因素方差分析, 结果表明: 介质类型和植物种类对储水量变化值和蒸散量均具有显著影响, 且二者具有极显著的交互作用 (表 4)。



注: T₁、T₂……T₁₁ 代表时间, 分别代表 2014 年 6—10 月和 2015 年 4—10 月各月份。 Note: T₁, T₂...T₁₁ were monthly date from June to October in 2014 and from April to October in 2015.

图 5 各处理每月平均储水量与第一个月储水量的差值 (左) 和累积蒸散量 (右) 随时间变化

Fig. 5 The difference between the average water storage in every month and the first month (the left) and cumulative evapotranspiration (the right) changed with time in different treatments

表 4 介质类型和植物类型对研究期间储水量变化值和累积蒸散量的影响 (二因素方差分析)

Table 4 Effects of medium and plant type on the difference between the water storage at the end and the beginning of the study and cumulative evapotranspiration (two-factor ANOVA)

固定因子 Factors	df	F	P
介质类型 Media type	2	16.69	0.000
植物种类 Plant type	1	64.72	0.000
介质类型×植物种类 Media type × Plant type	2	5.571	0.019

3 讨论

3.1 介质类型对植物生长的影响

本研究以灌木柠条和草本苜蓿 2 龄幼苗为研究对象, 两种植物在含煤矸石土壤和含钙结石土壤中均可存活。煤矸石对植物生长具有消极影响 (表 2), 这与前人研究结果^[18-19]一致。煤矸石富含重金属和硫, 盐度和酸碱度与土壤不同, 其存在改变了土壤生态环境^[18, 20], 是其对植物生长具有负效应的主要原因。已有研究表明, 神木矿区土壤存在镉 (Cd)

和镍 (Ni) 污染, 其中 Cd 含量平均值超过 $0.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过国家一级标准土壤背景值^[21-22], 土壤 pH 低于非矿区^[23]。1 龄植物幼小, 抵抗土壤环境变化的能力较弱, 受煤矸石的影响更为显著。含煤矸石土壤与无碎石土壤中苜蓿地上部生物量差异较柠条更小 (表 2), 说明不同类型植物对煤矸石的适应性不同, 苜蓿优于柠条。因此, 在制定含煤矸石土壤中植被恢复策略时, 应优先选择苜蓿。

钙结石对植物生长无显著影响。Mi 等^[13]在本研究同期也设计土柱试验研究了钙结石含量 (100 、 300 、 $500 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 对柠条生长的影响, 土柱试验中 $300 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 钙结石土壤中水分利用效率高于无碎石土壤, 但两种介质中植物生长状况相似, 与本研究小区试验的研究结果一致。土柱试验中钙结石含量达到 $500 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 对植物生长才会有明显抑制作用。碎石影响植物生长的物理机制为: 土壤中碎石的存在能够增加大孔隙数量^[24], 利于根系穿插和优化土壤孔隙比例; 碎石中水分可供植物吸收利用, 能够缓解水分胁迫^[8]; 碎石的存在还具有保温作用^[25]。同时, 碎石的存在占据一部分土壤体积, 减小土壤中总有效水含量; 碎石硬度大, 增加植物根系的穿插阻力。前者利于植物生长, 为正效应; 后者则限制植物生长, 为负效应。中等含量钙结石对植物生长几乎无影响, 说明钙结石对植物生长的正负效应相抵, 当钙结石含量达到 $500 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 对植物生长的负效应显著。

3.2 介质类型对土壤含水量的影响

本研究中含水量高低与植物生长状况刚好相反, 不含碎石土壤和含钙结石土壤中植物生长状况较好, 对应含水量低, 含煤矸石土壤中植物生长弱, 对应含水量高 (表 2 和图 3)。煤矸石和钙结石均具有抑制土壤蒸发的作用, 因此, 植物耗水量小可能是含煤矸石土壤含水量较高的主要原因。本研究中含煤矸石土壤与上覆土层的煤矸石填充重构土壤含水量变化不同。上覆土层的煤矸石填充重构土壤水分在覆土层与矸石层发生突变, 覆土层含水量显著大于矸石层^[26]。

含钙结石土壤与无碎石土壤含水量无显著差异 (图 3)。本研究结果与 Ceacero 等^[10, 27]和 Novák 和 Kňava^[28]研究不同, 他们研究表明, 随着碎石含

量的增加, 含水量降低。碎石含量越高, 土壤中非 (弱) 持水性介质的体积增加, 可导致总含水量减小。Tétégan 等^[8]利用具有吸水性的卵石 (孔隙度范围为 $6\%\sim 37\%$) 研究得出, 植物也可从碎石中吸水, 碎石具有水库的作用, 这说明吸水性碎石参与水分循环过程。因此, 碎石的吸水能力影响土石混合介质中含水量。本研究中钙结石饱和含水量达 $0.160 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。而 Ceacero 等^[10, 27]研究中石灰石碎石的平均孔隙度仅有 1.3% , 远小于钙结石。Novák 和 Kňava^[28]所研究的碎石为花岗岩碎石, 测定的最大持水量范围为 $0.02\sim 0.16 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, 也小于钙结石。此外, Mi 等^[13]研究证实累积同等质量的生物量, $300 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 含钙结石土壤中植物蒸腾消耗的水分最少。Ceacero 等^[10]的研究认为碎石含量为 17% 时水分利用效率最高, 也证实确实存在一个最优的碎石含量, 对应水分利用效率最高。本研究中含钙结石土壤与无碎石土壤中植物地上部生物量相近 (表 2), 蒸腾耗水量应为含钙结石土壤低于对照土壤, 与前人研究的土壤蒸发结果结合, 可推断蒸散量应为含钙结石土壤低于对照土壤, 与本研究结果 (图 5 右) 吻合。

两种植物对水分变化的响应不同 (图 3), 与灌草生长特征差异有关。柠条为单株栽种, 研究初期植株幼小, 蒸腾耗水量小, 小区内含水量高; 研究后期随植株长大, 蒸腾耗水量持续增加, 小区内含水量逐渐减小; 苜蓿在研究初期生长较快, 耗水量大于柠条, 但后期耗水量小于柠条。至研究末期两种植物对应小区内水分几乎一致 (图 3), 总耗水量为柠条小区高于苜蓿小区。柠条和苜蓿小区中无碎石土壤月平均储水量分别为 86 和 81 mm , 含煤矸石、钙结石土壤与无碎石土壤中蒸散量的差值分别占土壤平均储水量 12% 和 23% , 这说明煤矸石和钙结石均具有抑制土壤水分消耗的作用, 钙结石的抑制作用强于煤矸石。苜蓿小区中含煤矸石、钙结石土壤与无碎石土壤中蒸散量的差值则分别占土壤平均储水量 -11% 和 11% 。苜蓿小区中煤矸石的存在对土壤水分消耗无抑制作用, 钙结石的抑制作用弱于柠条 (图 5)。煤矸石和钙结石对土壤水分消耗的抑制作用对于持续耗水且耗水量高的柠条更为显著。

4 结 论

本研究设计小区试验,模拟黄土高原地区两种特殊的立地类型—含煤矸石土壤和含钙结石土壤,并以无碎石土壤作为对照。通过分析典型人工灌木和草本植物幼龄阶段的生长指标及各介质中含水量,得到以下结论:煤矸石对柠条和苜蓿的生长均具有显著抑制作用,且对柠条生长的抑制作用更强。介质类型和植物种类对含水量均具有显著影响,仅介质类型和土层深度对含水量的影响具有显著交互作用。柠条和苜蓿小区中含煤矸石土壤含水量均显著高于无碎石土壤和含钙结石土壤,后两种介质中则无显著差异。0~80 cm 土层中,介质间含水量的差异随土层深度增加呈先增加后减小的趋势,在30~50 cm 深度范围差异最大。煤矸石和钙结石对土壤水分消耗的抑制作用与植物类型有关,对苜蓿小区中抑制作用弱于柠条小区,与植物对介质的适应性和前期耗水情况有关。

参考文献 (References)

- [1] Zhou B B, Shao M A, Wen M, et al. Effects of coal gangue content on water movement and solute transport in a China Loess Plateau soil[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2010, 38 (11): 1031—1038.
- [2] Zhou B B, Shao M A, Shao H B. Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a loess plateau soil[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2009,341 (6): 462—472.
- [3] Zhen Q, She X Y, Zhang Y L, et al. Simulation of infiltration characteristics with various soil configurations in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia energy zone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2015, 46 (8): 90—96. [甄庆, 摄晓燕, 张应龙, 等. 晋陕蒙能源区不同构型土体水分入渗特性模拟[J]. *农业机械学报*, 2015, 46 (8): 90—96.]
- [4] Zhu Y J, Shao M A. Simulation experiments on soil moisture evaporation affected by calcic nodule contents[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (2): 77—81. [朱元骏, 邵明安. 钙结石含量对土壤水分蒸发影响的模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26 (2): 77—81.]
- [5] Zhou B B. Experimental study on the water movement and solute transport of the soil-stone mixtures[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture & Forestry University, 2009. [周蓓蓓. 土石混合介质水分溶质运移的试验研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.]
- [6] van Wesemael B, Poesen J, de Figueiredo T. Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall[J]. *Soil Tillage Research*, 1995, 33 (3/4): 229—260.
- [7] van Wesemael B, Poesen J, Kosmas C S, et al. Evaporation from cultivated soils containing rock fragments[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 182: 65—82.
- [8] Tétégan M, Korboulewsky N, Bouthier A, et al. The role of pebbles in the water dynamics of a stony soil cultivated with young poplars[J]. *Plant and Soil*, 2015, 391 (1/2): 307—320.
- [9] Korboulewsky N, Tétégan M, Samouelian A, et al. Plants use water in the pores of rock fragments during drought[J]. *Plant and Soil*, 2020, 454 (1/2): 35—47.
- [10] Ceacero C J, Díaz-Hernández J L, Campo A D, et al. Soil rock fragment is stronger driver of spatio-temporal soil water dynamics and efficiency of water use than cultural management in holm oak plantations [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104495.
- [11] Jing Y. Coal gangue initiation environmental problems and comprehensive utilization station[J]. *Opencast Mining Technology*, 2008, 23 (4): 64—66. [敬毅. 煤矸石引发的环境问题及其综合利用现状[J]. *露天采矿技术*, 2008, 23 (4): 64—66.]
- [12] Li J Y, Wang J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239:1—17.
- [13] Mi M, Liu B, Shao M A. Effect of rock fragments content on water consumption, biomass and water-use efficiency of plants under different water conditions[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 574—582.
- [14] Gong T X, Zhu Y J, Shao M A. Spatial distribution of caliche nodules in surface soil and their influencing factors in the Liudaogou catchment of the northern Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2018, 329: 11—19.
- [15] Feng Z W. The biomass and productivity of the forestry ecosystem in China[M]. Beijing: Science Press, 1999. [冯宗炜. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [16] Wang J G, Fan J, Guo D L, et al. Seasonal variation of soil water content and water use efficiency in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (3): 236—240. [王建国, 樊军, 郭德亮, 等. 黄土高原水蚀风蚀区坡地土壤水分季节变化及水分利用效率[J]. *水土保持学报*, 2011, 25 (3): 236—240.]
- [17] Guo Z S. Vegetation carrying capacity of soil water in a semi-arid region of loess hilly in the Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture & Forestry University, 2004. [郭忠升. 黄土丘陵半干旱区土壤水分植被承载力研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.]
- [18] Wang R, Li X L, Ma Y, et al. Effects of coal gangue

- accumulation in Shengxiong coal mining of Qinghai on vegetation and soil of surrounding alpine wetland[J]. *Soils*, 2020, 52 (2): 386–393. [王锐, 李希来, 马钰, 等. 青海圣雄煤矿煤矸石堆积对周边高寒湿地植被和土壤的影响[J]. *土壤*, 2020, 52 (2): 386–393.]
- [19] Cheng L S, Cheng W, Bian Z F, et al. Wheat root exudation and soil nitrogen transformations in farmland reclaimed from coal gangue[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32 (3): 397–403. [程林森, 程伟, 卞正富, 等. 煤矸石复垦对小麦根系分泌特征和土壤氮转化的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32 (3): 397–403.]
- [20] Cui L P, Bai J F, Shi Y H, et al. Heavy metals in soil contaminated by coal mining activity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (6): 896–904. [崔龙鹏, 白建峰, 史永红, 等. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41 (6): 896–904.]
- [21] Shi Z F, Wang L. Contents of soil heavy metals and evaluation on the potential pollution risk in Shenmu mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 (6): 1150–1158. [石占飞, 王力. 神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (6): 1150–1158.]
- [22] Wang L, Wang L, He W X, et al. Contaminate characteristic of heavy metals in soils in Shenmu mining area[J]. *Ecology and Environment*, 2011, 20 (8): 1343–1347. [王丽, 王力, 和文祥, 等. 神木煤矿区土壤重金属污染特征研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20 (8): 1343–1347.]
- [23] Tong J. The soil fertility quality evaluation of coal mining area in the northern Shaanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016. [全婕. 陕北煤矿区土壤肥力质量评价[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.]
- [24] Xu L, Shi Z, Wang Y, et al. Contribution of rock fragments on formation of forest soil macropores in the stony mountains of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2012, 10 (2): 1220–1226.
- [25] Poesen J W, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. *Catena*, 1994, 23 (1/2): 1–28.
- [26] Xu L J, Zhu X M, Liu S G, et al. Temporal and spatial response characteristics of reconstructed soil moisture under different particle size coal gangue temperature field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43 (8): 2304–2310. [徐良骥, 朱小美, 刘曙光, 等. 不同粒径煤矸石温度场影响下重构土壤水分时空响应特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43 (8): 2304–2310.]
- [27] Ceacero C J, Diaz-Hernandez J L, del Campo A D, et al. Interactions between soil gravel content and neighboring vegetation control management in oak seedling establishment success in Mediterranean environments[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 271: 10–18.
- [28] Novák V, Kňava K. The influence of stoniness and canopy properties on soil water content distribution: Simulation of water movement in forest stony soil[J]. *European Journal of Forest Research*, 2012, 131 (6): 1727–1735.

(责任编辑: 陈荣府)