

# 裸岩石砾地客土土体结构对水肥渗漏的影响

张扬<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>1</sup>, 董起广<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;  
2. 陕西地建土地工程技术研究院, 国土资源部退化及未利用土地工程重点实验室, 西安 710075)

**摘要:** 针对裸岩石砾地利用客土法整治后新增耕地存在失水失肥的现象, 以秦岭北麓某荒石滩新增耕地客土耕层作为模拟研究对象, 将供试土壤以不同容重分层填装试验土柱, 并对其进行水分入渗试验, 分析了裸岩石砾地人为耕作层结构的水分、养分渗漏特征。通过对5种耕作层结构的模拟渗漏试验, 结果表明: (1) 人为耕层土壤初始渗漏能力和渗漏速率与模拟心土层容重呈负相关关系, 其入渗过程可用修正后的Kostiakov入渗模型进行模拟; (2) 心土层土壤容重对累积入渗量、入渗速率及养分流失量均有较大影响, 并呈负相关关系; (3) 分析养分总渗漏量显示, 存在一个最优耕层结构, 在此耕层结构具有较好的保肥效果。通过综合分析水肥渗漏状况, 确定最优耕层结构自下而上容重分别为1.5, 1.3, 1.2 g/cm<sup>3</sup>。

**关键词:** 秦岭北麓; 裸岩石砾地; 耕层结构; 水分及养分渗漏

中图分类号: TD88 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)01-0162-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.026

## Analysis of Water and Nutrients Leakage on Barren Gravel Land with Different Structure of Topsoil

ZHANG Yang<sup>1,2</sup>, LI Zhanbin<sup>1</sup>, DONG Qiguang<sup>2</sup>

(1. Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and Resources, Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075)

**Abstract:** Aiming at the problems such as poor effect of water and nutrient retention, instability and leakage in barren gravel land at the northern foot of Qinling Mountain, raw soil in Shaanxi Province was chosen as the tested soil to study the characteristics of water and nutrient leakage in topsoil with different structure. By filling the soil column hierarchically with different bulk density, five kinds of topsoil structure were set to analyze the leakage characteristics of water and nutrient in the artificial plough layer. The results showed that: (1) The initial leakage ability and the attenuation degree showed a negative correlation relationship with the underlying soil bulk density, and the infiltration process could be simulated by the modified Kostiakov infiltration empirical formula; (2) The underlying soil bulk density greatly affected the cumulative amount of leakage, water leakage rate and nutrient loss amount, and they showed negative correlation relationships; (3) From the perspective of the total nutrients leakage amount, there was an optimal structure of topsoil, which had the best effect of retaining fertilizer. By analyzing the leakage of water and nutrient comprehensively, the optimal structure of topsoil was that the bulk densities of the soil layers from the bottom to up were 1.5, 1.3 and 1.2 g/cm<sup>3</sup>, respectively.

**Keywords:** northern foot of Qinling Mountain; barren gravel land; structure of topsoil; water and nutrients leakage

土地是人类生存与发展的根本要素<sup>[1]</sup>。在我国, 可利用土地资源的不足已成为制约社会经济建设的重要因素, 特别是耕地资源的急剧减少, 严重威胁到区域农业健康发展和粮食安全。占补平衡政策的提出为经济

建设过程中对耕地资源的占有和利用, 保证耕地总量的稳定提供了一条有效的解决途径。因此, 对于潜在可利用土地资源的合理开发利用成为补充耕地资源不足的重要来源<sup>[2-4]</sup>。我国潜在可利用土地资源中, 裸岩石砾

地占到 32.31%, 面积覆盖范围广, 可开发潜力巨大<sup>[5-6]</sup>。其中, 仅陕西省可开发面积就达 2.33 万 hm<sup>2</sup>, 主要分布在秦岭北麓及陕南等光照和水资源丰富的地区, 具有较好的自然条件, 然而由于其地表粗大砾石裸露, 土地贫瘠, 开发难度大, 因此长期处于荒芜废弃状态。

耕作层重构是在土地整治工程领域解决农田耕层问题的有效技术手段, 目前国内外在土地整治领域对重构耕层结构的研究主要集中在污损或工矿废弃地等方面<sup>[7-10]</sup>, 针对裸岩石砾地土地整治进行的研究报道较少。已有的研究<sup>[5,11]</sup>表明, 当裸岩石砾地上耕层厚度为 50 cm 时, 能够有效实现玉米或冬小麦的高产, 但这一产量是建立在充分供水供肥的基础上, 耕层重构后出现的保水保肥效果差及渗漏失稳等问题依然是困扰此类土地上构建稳定耕层的重要制约因素。因此, 在上述研究基础上, 开展裸岩石砾地耕作层结构的研究尤为重要。本文通过试验模拟秦岭北麓裸岩石砾地, 构建不同耕作层结构, 揭示不同耕层结构下水分和养分的渗漏规律, 为裸岩石砾地土地整治工程提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

裸岩石砾地土地整治过程中需要大量客土。就地取材以节约成本是荒石滩客土整治工程中须重点考虑的要素。以陕西省秦岭北麓某旧河道荒石滩土地整治工程为例, 项目周边广泛分布的下层生土是客土来源的首要选择。本试验选取耕作层以下的生土层为供试客土土壤, 采样时间为 2015 年 3 月, 取土前去除地表杂质, 取土深度为 40—80 cm, 取土后将土样充分混合并带回实验室自然风干后过 1 cm 筛, 利用马尔文 2000 激光粒径分析仪进行测定其颗粒组成, 黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(>0.05 mm)含量分别为 9.54%, 77.10%, 13.36% (质地分级标准为美国制)。

### 1.2 试验设计

利用土柱填装试验模拟建立客土土层结构。试验采用内径为 10 cm、高 60 cm 的有机玻璃管作为土柱填装容器, 底部放置有孔径为 8 mm 的有机玻璃板, 填装土柱前在玻璃板上铺设一层纱布, 防止客土填装时土样漏出, 玻璃柱边壁标有刻度。根据实际荒石滩整治客土构型, 本试验的土柱填装按照不同容重分成 3 层, 分别模拟上部耕作层、中部犁底层和底部心土层<sup>[12-13]</sup>(图 1), 共 5 种处理方式(表 1)。土柱填装前, 根据容重设定计算每层所需土壤质量, 填装时通过夯土器击打控制容重, 进行分层填装, 每层之间做打毛处理。本试验仅对压实层土体按容重梯度设置不同处理(1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 g/cm<sup>3</sup>),

犁底层和耕作层土体容重则根据荒石滩地所在区域一般农用地耕层土壤容重设定, 并在各处理中保持相同。土柱填装完成后进行重力稳定, 静置时间>72 h。待土柱稳定后采用马氏瓶供水进行入渗试验, 入渗试验结束后, 依次进行 20, 40, 80 mm 的灌水渗漏试验以及 100 mm 的肥液(按 N 含量 225 kg/ha 施肥量将氮肥溶解在纯水中)渗漏试验, 肥液自土柱顶部逐渐加入, 经自然垂直渗漏, 从底部接取渗漏液, 并对渗漏液的水量和养分含量进行测定。待上一次灌水结束, 直至土柱不再有水分渗出后进行下一次灌水试验, 此时, 土柱各层含水量接近田间持水量, 试验共进行 3 次重复。

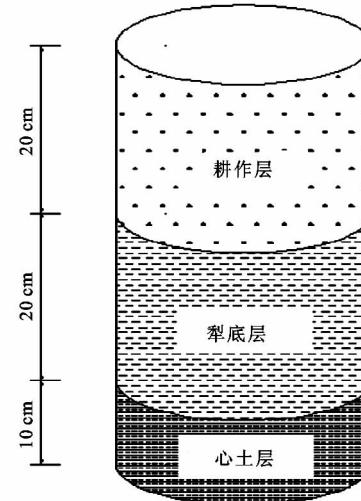


图 1 土柱填充示意

表 1 模拟试验土柱土层填装处理

处理	模拟心土层		模拟犁底层		模拟耕作层	
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	厚度/cm	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	厚度/cm	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	厚度/cm
S1	1.4	10	1.3	20	1.2	20
S2	1.5	10	1.3	20	1.2	20
S3	1.6	10	1.3	20	1.2	20
S4	1.7	10	1.3	20	1.2	20
CK	装土厚度 50 cm, 容重 1.2 g·cm <sup>-3</sup> (容重均一)					

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分渗漏随时间的变化特征

在灌水量为 100 mm 时, 5 种处理方式下土壤水分渗漏速率如图 2 所示。对比不同处理下土柱中水分渗漏速率, 当心土层容重为 1.2 g/cm<sup>3</sup> (CK) 时初始渗漏速率最大, 达到 10.7 mm/h, 水分渗漏最为严重; 在上层和中层容重相同的情况下, 对比不同处理下初始水分渗漏速率表现为 S1>S2>S3>S4, 对应的初始渗漏速率分别为 4.00, 2.23, 1.46, 0.20 mm/h。随着入渗时间的延长, 各处理的渗漏速率均呈现逐渐减小的趋势, 分析认为一方面受到水头压减小的影响, 另一方面则与下层土壤容重增大有关。随着心土层容重的增大, 入渗率随时间衰减的显著度呈现减

小的趋势,即心土层容重越大,入渗率随时间的变化范围越小,当心土层容重为  $1.6\sim1.7\text{ g/cm}^3$  时,模拟压实层形成一个相对致密的弱透水层,造成水分在该层土体之上的汇集,甚至造成模拟犁底层和耕作层的饱和,入渗率随时间变化相对稳定。

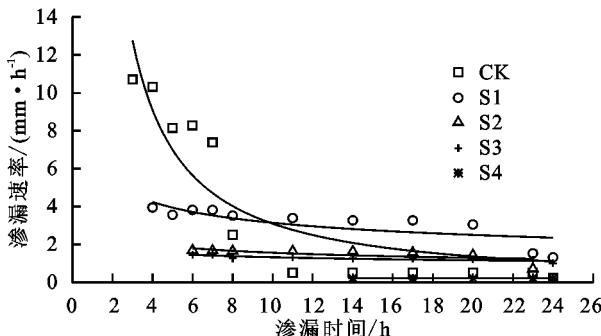


图 2 100 mm 灌水条件下不同土体处理渗漏速率随时间变化曲线

入渗速率可直观的反映土体的入渗能力。利用 Kostiakov<sup>[14]</sup> 土壤水分渗漏模型对本研究渗漏过程进行拟合,与实际情况吻合较好,公式为:

$$i(t) = at^{-b} \quad (1)$$

$$I(t) = \frac{a}{1-b} t^{1-b} = K \cdot t^{1-b} \quad (2)$$

式中: $i(t)$  为渗漏速率( $\text{mm}/\text{h}$ ); $t$  为渗漏时间( $\text{h}$ ); $a, b$  为拟合参数; $I(t)$  为累积渗漏量( $\text{mm}$ ); $K$  为经验系数。由于开始入渗到开始渗漏之间存在一定的时间间隔,在采用入渗公式对渗漏量拟合时,进行了修正,修正后的公式为:

$$I(t) = K \cdot (t - c) t^{1-b} \quad (3)$$

式中: $c$  为修正参数;其他参数含义与公式(2)相同。

采用公式(3)进行拟合的结果见表 2 和图 3。由表 2 可知,决定系数  $R^2$  均在 90% 以上。在渗漏初始阶段, $K$  值起主导作用<sup>[15]</sup>,说明 CK 在初始阶段渗漏能力最大,约为 S1 的 7 倍,而 S4 初始渗漏能力极弱,接近于 0。 $b$  值则反映了土壤渗漏能力的衰减速度,CK 的  $b$  值最大,因此随着时间的增加其渗漏能力减弱的越厉害,而 S4 渗漏能力减弱最不明显。由此说明,在同等灌水量情况下,心土层容重越大其初始渗漏能力越大,且其渗漏能力随时间的增长衰减越厉害,而心土层容重越小,其初始渗漏能力越小,但其随时间的衰减程度也越小。图 3 反映了各处理下累积渗漏量随渗漏时间的变化关系。不同心土层容重下渗漏速率的差异决定了累积渗漏量差异的显著性。从图 3 可以看出,CK 处理的累积渗漏量在 10 h 后趋于稳定,在 24 h 时为 55.0 mm,S1 在 24 h 时的累积渗漏量为 53.2 mm;S4 在 24 h 的累积渗漏量仅为 2.6 mm;S2 和 S3 在 24 h 时的累积渗漏量介于 S1 和 S4 之间,分别为 26.1,22.9 mm。

表 2 不同处理下水分渗漏模型

处理	方程参数			$R^2$
	$K$	$c$	$b$	
CK	27.19	3.98	0.76	0.93
S1	3.96	3.96	0.13	0.99
S2	0.61	5.00	-0.28	1.00
S3	0.35	4.00	-0.37	0.99
S4	2.83E-04	5.00	-2.09	0.98

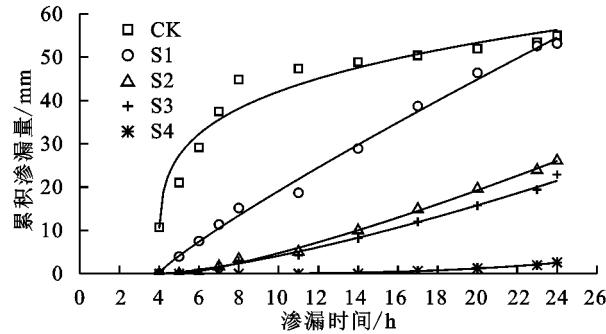


图 3 累积渗漏量变化关系曲线

## 2.2 心土层容重对水分渗漏特性的影响

由图 4 可知,各个处理 24 h 内的平均渗漏速率大小顺序与初始渗漏速率的顺序保持一致,CK、S1、S2、S3、S4 分别为  $4.2, 3.0, 1.5, 1.3, 0.2\text{ mm}/\text{h}$ 。初始渗漏速率与心土层容重呈明显的线性负相关,决定系数  $R^2$  为 96%。当心土层容重由  $1.2\text{ g/cm}^3$  增加到  $1.7\text{ g/cm}^3$ ,即增加 41.7% 时,渗漏速率由  $4.2\text{ mm}/\text{h}$  减少到  $0.2\text{ mm}/\text{h}$ ,减少了 95.2%。由图 5 和图 6 可知,在 20,40,80 mm 灌水量的情况下,心土层容重越大,其对应的渗漏量越小,且灌水量越大各处理之间渗漏量的差异越明显;心土层容重为  $1.7\text{ g/cm}^3$  时,渗漏量保持在一个稳定的数值,不随灌水量的变化而变化,其他处理的灌水量与渗漏量之间呈线性正相关,决定系数均在 95% 以上。

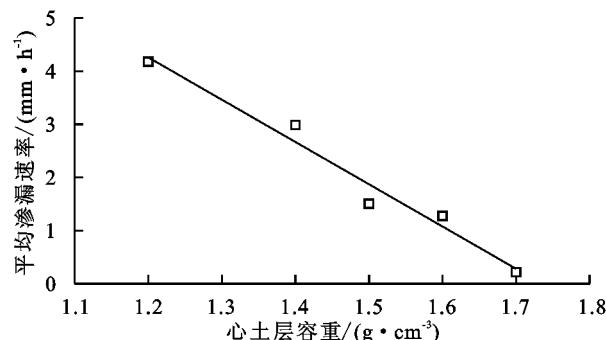


图 4 平均渗漏速率与心土层容重关系曲线

由表 3 可知,CK 与 S1 的渗漏率较大,S4 的渗漏率最小,两者相差 4~19 倍,而 S2 和 S3 介于两者之间,平均渗漏率为 40%~60%。说明当心土层容重较小为  $1.2\sim1.4\text{ g/cm}^3$  时,土壤的大孔隙多,土壤内部的连通性好,水分渗漏也多,容易发生沉降问题,且其保水效果差;当心土层容重过大达到  $1.7\text{ g/cm}^3$  时,土壤之间孔隙小,其水分渗漏微弱,仅为 8.63%,

这种构型的土壤遇到中型或大型降水时,不能及时排除明水,不利于作物生长,且易发生土壤表层的侵蚀; S2 和 S3 构型的土壤则既能保持耕作层的水分,又能及时排除耕作层明水,保持土体的稳定。

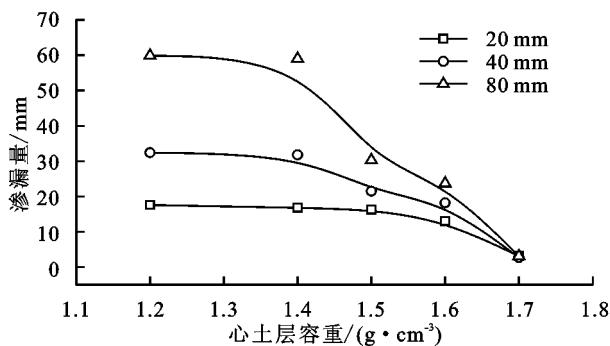


图 5 渗漏量与心土层容重的关系曲线

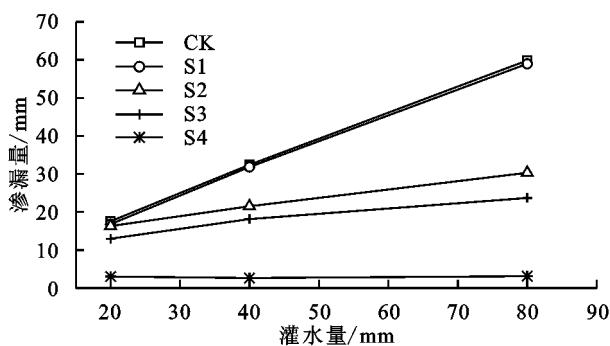


图 6 不同处理下渗漏量与灌水量关系曲线

表 3 不同灌水量不同处理方式下的渗漏率

灌水量/mm	渗漏率/%				
	CK	S1	S2	S3	S4
20	87.90	84.08	81.53	64.97	15.29
40	81.05	79.62	53.82	45.38	6.69
80	74.84	73.73	37.90	29.62	3.90
平均值	81.26	79.14	57.75	46.66	8.63

### 2.3 养分渗漏量的变化特征

农田土壤养分淋失会消耗土壤肥力,加速土壤酸化,增加化肥投入,减少作物产量<sup>[16-17]</sup>,不同耕层结构的保肥能力可由渗漏液中养分的含量判断。根据测定的渗漏液中硝态氮浓度和渗漏液体积,计算出每天渗漏的硝态氮含量。由图 7 可知,各个处理下,前 3 d 养分的渗漏量较大,在第 1 天渗漏量达到最大值,且 CK 最大,为 25.36 mg,达到混入 N 量的 6.59%;其次是 S1,为 11.08 mg,达到混入 N 量的 2.88%;S2 和 S3 无显著差别,分别为 2.7, 2.95 mg, 占混入 N 量的 0.70%, 0.77%;S4 最小,为 0.48 mg, 占混入 N 量的 0.12%。主要是由于 CK 处理未经过界面层压实,土壤较为松散,耕作层结构上下一致,故其水分和养分初始渗漏量均最大,而 S1 心土层容重较小,同样不利于保肥;S2 和 S3 初始保肥性能相对良好;S4 初始保肥能力最好,但由于其水分渗漏量过低,不能够及时将土壤水分降低至作物耐淹水深以下,阻碍土壤水、肥、气和热的交换,不利于作物生长。

将硝态氮日渗漏量累加,得到心土层容重与硝态氮总渗漏量的关系曲线。从图 8 中可以看出,当心土层容重为 1.2~1.5 g/cm<sup>3</sup> 时,其养分渗漏量与心土层容重之间呈线性负相关关系,而当心土层容重在 1.5~1.7 g/cm<sup>3</sup> 时,硝态氮总渗漏量无显著差异,且略有增长趋势。由此看来,在渗漏初期虽然心土层容重越大,保肥能力越好,但是在长时间内,心土层容重为 1.5~1.7 g/cm<sup>3</sup> 时,其养分总渗漏量相差不大,且心土层容重为 1.5 g/cm<sup>3</sup>,即 S2 处理方式下,土壤保肥效果最为理想,共渗漏 4.73 mg, 仅为总量的 1.23%,而 CK 渗漏 47.81 mg, 为总量的 12.42%。

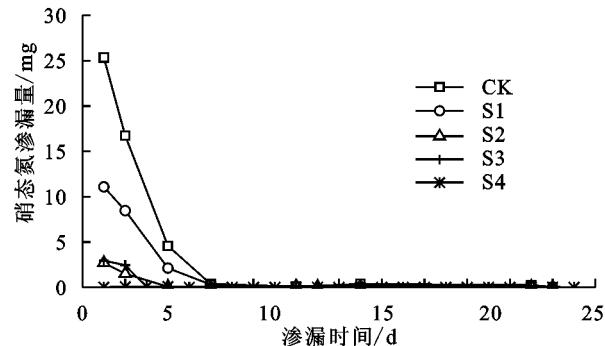


图 7 硝态氮渗漏量的变化特征

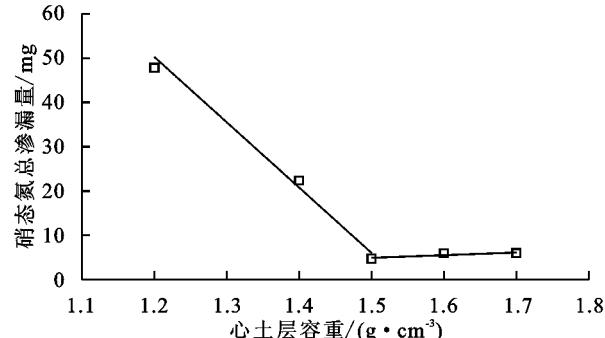


图 8 硝态氮总渗漏量与心土层容重关系曲线

### 3 讨论与结论

(1) 耕层结构对土壤水分和养分的保持有较大影响。利用修正后的 Kostiakov 入渗经验公式对渗漏量进行拟合,拟合效果较好,决定系数在 90% 以上。拟合结果说明,在同等灌水量情况下,心土层容重越大其初始渗漏能力越小,且其渗漏能力随时间的增长衰减程度越小,而心土层容重越小,初始渗漏能力越大,但其随时间的衰减程度也越厉害,这说明具有较大心土层容重的土体结构稳定性强,渗漏能力随时间的变化弱,而心土层容重较小时,其土体结构稳定性差,渗漏能力会随着时间的推移发生较大改变。影响土壤入渗的因素大多是通过影响孔隙状况来影响的<sup>[15]</sup>,容重越大,土壤压实程度也越大,进而导致土壤间的孔隙度变小,水分运动的通道也会变窄,水分渗漏能力越差,保水性越好,而容重越小,则土壤孔隙相对也越大,水分运动的通道也较多,使得水分能够

快速向下入渗,其保水性也相对较差。

(2)心土层容重对水分渗漏速率和渗漏量的影响较大,心土层容重越大,水分渗漏速率越小,当心土层容重为  $1.2 \text{ g/cm}^3$  时,初始渗漏速率最大,达到  $10.7 \text{ mm/h}$ ,平均渗漏速率为  $4.2 \text{ mm/h}$ ;当心土层容重为  $1.7 \text{ g/cm}^3$  时,初始渗漏速率和平均渗漏速率均最小,皆为  $0.2 \text{ mm/h}$ ;心土层容重为  $1.2 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$  时,其渗漏量较大,渗漏率达到 80% 左右,不能有效地保持土壤水分;心土层容重为  $1.7 \text{ g/cm}^3$  及以上时水分渗漏率极低,难以适时排出降雨和灌溉的明水,易造成土壤表层侵蚀、作物被水淹没,引起水分胁迫等问题;心土层容重为  $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$  时,即 S2 和 S3 处理下,水分渗漏率在 40%~50%,既能保持耕作层的水分,又能及时排除耕作层明水。在灌水量增大时,心土层容重对于水分渗漏率的影响明显增大,主要表现为灌水量为  $20 \text{ mm}$  时,CK 处理水分渗漏率为 S4 处理的 5.7 倍,灌水量增大到  $80 \text{ mm}$  时,CK 处理水分渗漏率变为 S4 处理的 9.4 倍。刘营营等<sup>[18]</sup>研究认为,土壤容重对水分入渗过程有显著影响,容重越大,渗透能力越弱,这与本文的研究结果相近。对于农业用地来说,土壤保水性太差,则不能为作物生长提供足够可利用的水分,保水性太好,入渗能力过低,则会造成作物长期被水淹没及土壤的大量侵蚀。

(3)在各处理下,养分的初始渗漏量由大到小分别为 CK>S1>S3>S2>S4,其硝态氮初始渗漏量依此为  $25.36, 11.08, 2.95, 2.7, 0.48 \text{ mg}$ ;但总渗漏量从大到小为 CK>S1>S4>S3>S2,最小 S2 为  $4.73 \text{ mg}$ ,最大 CK 为  $47.81 \text{ mg}$ ,分别占到总混入量的 1.23% 和 12.42%。李志明等<sup>[19]</sup>研究表明,容重越大,溶质运移的阻力因子也越大,土壤容重改变,导致其固体颗粒排列的变化,引起了养分迁移路径和和曲折通路不同,在保肥能力方面,容重小的土壤结构,明显不利于养分的保持,其养分初始渗漏量和总渗漏量都较大,容重大的土壤结构,由于其水分渗漏能力差,所以在灌水初期养分渗漏较少,但容重过大( $1.7 \text{ g/cm}^3$ )时,在灌水量相同的条件下,其水分的渗漏时间明显延长,养分的渗漏总量反而较适宜容重( $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ )大。同时,在一定的土壤容重范围内,总吸收量均随着下层土壤容重的增加而降低<sup>[20]</sup>,心土层容重过大也不利于作物根系对养分的吸收。

(4)综上所述,裸岩石砾地土地整治中最佳的重构耕层结构为 S2,其次为 S3, S1 和 S4 较差。良好的耕层构造,能最大限度地满足作物水分和对养分的需求<sup>[21]</sup>,聂影<sup>[22]</sup>通过调查研究认为,玉米根系生长适宜的土壤容重为  $1.10 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ ,适合玉米生长的最低耕层深度为  $22 \text{ cm}$ ,本研究设置的耕层结构最上层耕作层容重为

$1.2 \text{ g/cm}^3$ ,深度为  $20 \text{ cm}$ ,能够适宜玉米等作物生长,加上心土层较好的保水保肥效果和良好的通气性,可有效促进作物生长,提高生物学产量和经济产量。在裸岩石砾地的土地整治中,重建合理的耕层结构,不仅能够解决保水保肥能力差及渗漏失稳的问题,更能获得较高的综合效益,有利于提高土地生产力和水分利用效率,以促进该地区整治后土地的可持续利用。

#### 参考文献:

- [1] 谷树忠,成升魁.中国资源报告:新时期中国资源安全透视[M].北京:商务印书馆,2010:105-144.
- [2] 张英,张红旗,李秀彬.近 20 年中国农业主产区耕地资源质量和产能变化研究[J].地理与地理信息科学,2011,27(4):52-56.
- [3] 刘洛,徐新良,刘纪远,等.1990—2010 年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响[J].地理学报,2014,69(12):1767-1778.
- [4] 张凤荣,薛永森,鞠正山,等.中国耕地的数量与质量变化分析[J].资源科学,1998,20(5):32-38.
- [5] 李娟,张扬,韩雾昌,等.不同覆土厚度对裸岩石砾地土壤化学性状和春玉米产量的影响[J].安徽农业科学,2013,41(5):2037-2039,2060.
- [6] 易玲,张增祥,汪潇,等.近 30 年中国主要耕地后备资源的时空变化[J].农业工程学报,2013,29(6):1-12.
- [7] 张华.北京房山区黄院采石场松散堆积体生态修复技术研究[D].北京:北京林业大学,2013.
- [8] 胡振琪,魏忠义,秦萍.矿山复垦土壤重构的概念与方法[J].土壤,2005,37(1):8-12.
- [9] 徐良骥,严家平,高永梅,等.煤矿塌陷区覆土造地综合研究:以新庄致矿为例[J].煤田地质与勘探,2007,35(1):56-58.
- [10] Bradshaw A D, Hüttl R F. Future minesite restoration involves a broader approach [J]. Ecological Engineering, 2001, 17(2/3):87-90.
- [11] 李娟,张扬,韩雾昌,等.不同覆土厚度对裸岩石砾地土壤理化性状和冬小麦产量的影响[J].安徽农业科学,2013,41(12):5312-5314,5341.
- [12] 摄晓燕,谢永生,王辉,等.主要农用黄绵土典型剖面养分分布特征及历史演变[J].水土保持学报,2010,24(4):69-77.
- [13] 张振华,谢恒星,刘继龙,等.气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析[J].水土保持学报,2005,19(4):36-39.
- [14] 李援农,林性粹.均质土壤积水入渗的气阻变化规律及其影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(3):88-93.
- [15] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(60):40-45.
- [16] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma, 2010, 158(3/4):436-442.