

砒砂岩区排土场新构土体保水效应研究*

任志胜¹ 申卫博^{1, 2} 解倩¹ 王彤彤¹ 郑纪勇^{1, 2†} 张兴昌^{1, 2}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 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 以晋陕蒙露天煤矿区排土场为研究对象, 利用土壤水分定位试验观测数据, 研究了不同复配方式人工新构土体水分时空变化规律。结果表明: (1) 排土场土体年内变化周期可分为雨季丰水期(7月—10月)和旱季贫水期(11月—翌年6月), 土壤水分主要受自然降雨、蒸散、底层渗漏的影响; (2) 与无防渗层土体相比, 7月—10月雨量丰沛期防渗层的水分蓄积作用明显, 较对照高9.65%~13%, 防渗层处理的土体底层体积含水量增加了21.6%, 砒砂岩防渗层、工程防渗布在蓄积水分上并没有显著差异; (3) 风化煤增加了表层土体蒸发损失, 不利于土体的持水性的提高; 砒砂岩增加了土体剖面持水能力, 相对于沙黄土, 复配土体0~30 cm层次土壤体积含水量增加约3.36%~9.57%, 30~40 cm底层约增加11.16%~13.65%。综合来看, 砒砂岩掺混显著增强了土体的持水蓄水能力, 防渗层有效截留渗漏水分并持续供给土体, 对涵养土壤水库有积极作用。

关键词 晋陕蒙矿区; 砒砂岩; 排土场; 新构土体; 土壤体积含水量

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

晋陕蒙矿区是我国最大的煤化工能源基地, 位于黄河中游的陕北、晋西北与蒙南部交接地区, 是风蚀、水蚀交错的多沙地带, 总面积 $5.44 \times 10^3 \text{ km}^2$, 其中砒砂岩分布区 $1.67 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[1]。由于矿区排土场土层薄($\leq 50 \text{ cm}$, 农用地标准)、质地粗($0.02 \sim 2 \text{ mm}$ 砂粒 $\geq 70\%$), 加之该地区又位于水资源稀少的干旱半干旱气候区, 土壤水分多以蒸发或渗漏形式损失, 因此排土场复垦土壤面临蒸发量大、保水困难等问题。土壤水分是排土场脆弱生态系统水热平衡及系统稳定的基础, 是土壤生态平衡重建的关键^[2], 因此如何解决底部渗漏严重、上部蒸发强烈一直是该地区排土场生态恢复工作中面临的主要问题。

矿区土壤类型多以沙黄土和砒砂岩为主, 其中沙黄土质地疏松、结构差, 砒砂岩成岩程度低, 颗粒间胶结作用弱, 如何充分利用当地资源, 就地取材, 对现有土壤进行质地改良, 提高排土场土壤保水能力和防止水分渗漏成为当前该地区矿区复垦科学研究中的一个热点^[3-5]。关于利用砒砂岩中蒙脱石含量高、保水保肥性能高的性质改造粗质地土壤的研究目前多有开展。有学者发现将砒砂岩、风沙土按一定比例掺混, 可以显著降低风沙土的 K_s 值等入渗指标, 提高土壤的蓄水和持水性能^[5-6]。赵宣等^[7]将砒砂岩与沙掺混发现砒砂岩掺混提高了土体中水稳性团聚体含量, 李娟等^[8]研究发现砒砂岩与沙复配土体经过3年熟化后, 土壤储水量

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)、科技部科技惠民计划项目(2012GS610203)资助 Supported by the CAS Action-Plan for West Development (No. KZCX2-XB3-13), and Science and Technology Program for Public Wellbeing of the Ministry of Science and Technology (No. 2012GS610203)

† 通讯作者 Corresponding author: 郑纪勇(1974—), 男, 山东聊城人, 博士, 副研究员, 硕士生导师。E-mail: zhjy@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 任志胜(1989—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事矿区修复、土壤生态研究。E-mail: renzhishang@foxmail.com

收稿日期: 2015-12-16; 收到修改稿日期: 2016-03-09; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-04-01

显著高于对照，且随着年限增加，复配土体中砂粒含量减少、粉粒含量有增加趋势，而适当的粗黏颗粒组成是土体保水性、作物生长的基础^[9-10]，这就为探索土体高效保水方案提供了参考。对于通过砒砂岩改良沙黄土质地的可行性，在前人研究的基础上，本课题组通过室内蒸发模拟试验进行了分析验证，综合考虑持水供水能力，认为沙黄土、砒砂岩7:3比例具有良好的改良潜质^[3, 11]。

现阶段复配土体水分效应研究多集中于室内条件下土体水动力参数模拟，而通过研究自然条件下复配土体水分动态变化规律而选定水分高效利用的土体复配方案却鲜见报道。因此，田间定位条件下分析不同复配方式下土壤水分时空变化特征，探索复配土体水分的时空变化规律，明确土体高效水分利用的复配方案，对于排土场生态系统的恢复与重建具有科学意义和实践指导价值。

本研究选择充分熟化2年的不同复配模式土体，通过自然条件下不同复配土体土壤体积含水量1年的动态观测，研究土壤水分在土壤剖面不同层次的分布及动态变化，以期阐明不同复配模式土体水分的时空变化规律，为水分高效利用土体复配模式的选取提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区准格尔旗永利煤矿排土场（39°69'N，110°27'E），地处鄂尔多斯高原中东部，是黄土高原与鄂尔多斯高原交错的风蚀水蚀交错地带，煤资源丰富，平均海拔1 400 m，为大陆性干旱半干旱气候，属典型砒砂岩、沙黄土（或沙盖黄土）分布区。该区年均降雨量400 mm、年均气温6.2℃，年潜在蒸发3 200 mm，但降雨年际、季节分配不均，主要集中于7—9月。

1.2 土体重构模式及试验设计

不同土体重构模式土壤生态效应研究试验设置6个处理，3个重复，于2013年7月修建18个规格为5 m × 5 m、深50 cm小区，土体重构及土壤改良方案如下：（1）沙黄土与砒砂岩掺混（7:3，w/w），50 cm下设砒砂岩防渗，标号L-S-SP；（2）沙黄土与砒砂岩掺混，50 cm下设工程防渗布，标号L-S-PP；（3）沙黄土、砒砂岩、风化煤掺混（27 t hm⁻²），50 cm下设工程防渗布，标号L-SW-PP；（4）沙黄土、风化煤掺混，50 cm下设工程防渗布防渗层，标号L-W-PP；（5）沙黄

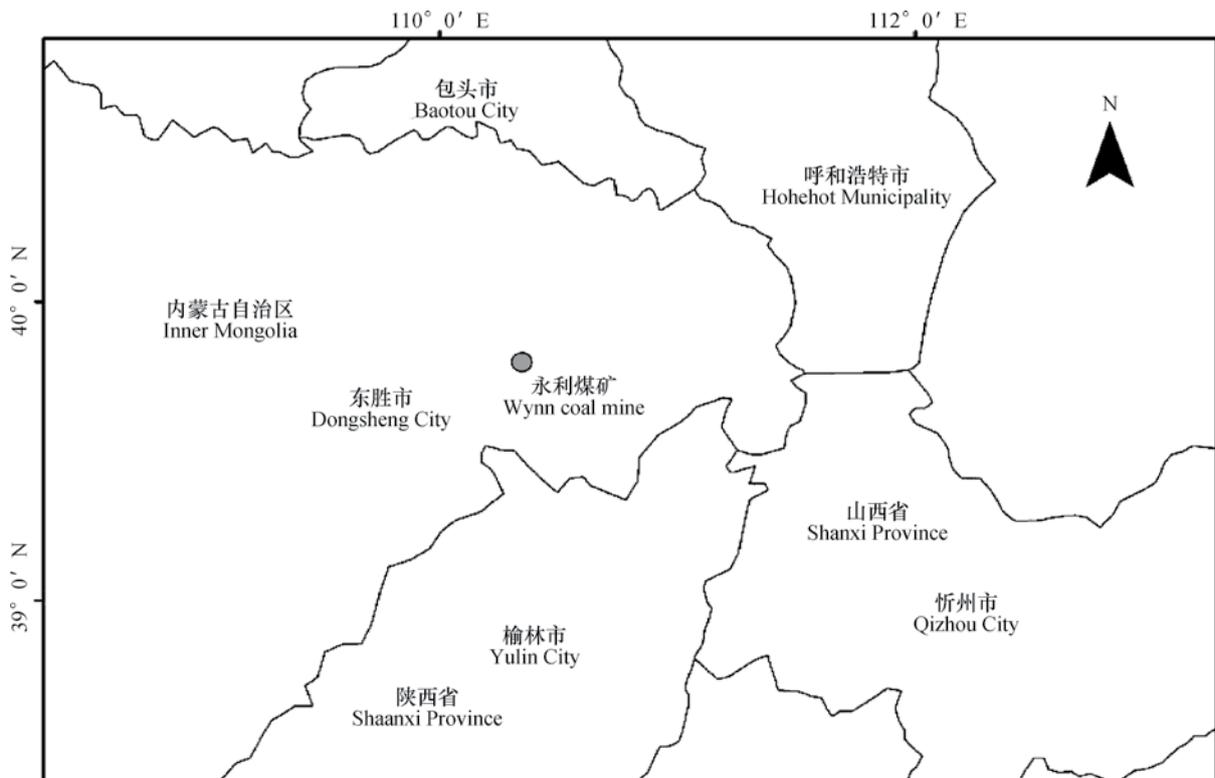


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Sketch location map of the test area

土、风化煤掺混, 无防渗层, 标号L-S; (6) 沙黄土, 无质地改良, 无防渗层, 标号L。以上各处理按“土壤—质地改良措施—防渗措施”格式进行标识, 其中“L”代表沙黄土, “S”代表砒砂岩, “SP”代表砒砂岩防渗层, “PP”代表工程防渗布。试验所用砒砂岩取自鄂尔多斯市暖水镇砒砂岩示范区, 沙黄土为当地取材, 其颗粒组成见表2。小区中部安装50 cm Trime-TDR管。

试验监测周期为2014年7月至2015年7月, 各

小区于5月2日种植大豆 (*Glycine max*, 陕701), 大豆生长期为2014年6月至9月, 其余观测时间段内为裸地监测。阻抗测试仪TDR (IMKO, Germany) 定位测定土壤体积含水量, 以10 cm间隔分层测定0~50 cm范围内土壤体积含水量, 每次月初测定, 若遇雨雪天气延后。土体蒸散数据由位于小区内的微型蒸发器 (Micro-lysimeter) 测量所得, 气象数据由试验地微型气象站U30-NRC (Onset, USA) 获得。

表1 供试土壤的颗粒分级

Table 1 Particle size distribution of the tested soil

土壤类型 Soil type	砂粒 ($\geq 0.02 \sim 2$ mm) Sand content (%)	粉粒 ($\geq 0.002 \sim 0.02$ mm) Silt content (%)	黏粒 (< 0.002 mm) Clay content (%)	土壤质地 Soil texture
砒砂岩 Soft sandstone	34.55	59.08	6.37	粉砂质壤土 Silty loam soil
沙黄土 Sandy loess	70.14	16.41	13.45	砂质壤土 Sandy loam soil

1.3 数据处理

数据采用Excel 2007处理和SigmaPlot 10.0软件作图, 采用SPSS 19.0进行方差显著性检验 (Duncan)。土体储水量计算公式如式(1), 水量平衡公式如式(2):

$$V = \sum V_i; V_i = \theta_v \times h \quad (1)$$

$$\Delta W = P - ET - D \quad (2)$$

式中, V 为土壤水分总贮存量 (mm); V_i 为分层土壤水分贮存量 (mm), $i=1, 2, \dots$; h 为土层厚度 (cm); θ_v 为土壤体积含水量 (%); ΔW 为土壤储水量的变化 (mm); P 为降雨量 (mm); ET 为土体蒸散量 (mm); D 为土壤水分深层渗漏量 (mm)。

2 结果

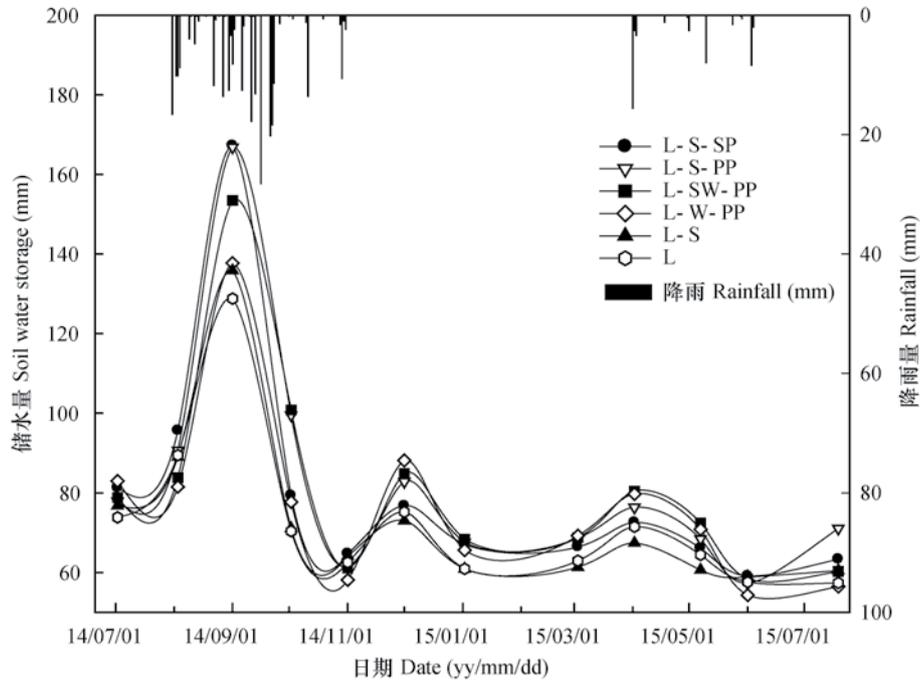
2.1 土壤储水量随时间的动态变化

0~50 cm土层储水量随时间变化如图2所示。土壤水分的动态变化是气候波动和植被时空动态变化的直接反映, 复配土体深50 cm, 覆于矿渣、砾石之上, 无地下水上行补给, 自然降雨成为土体水分补给的唯一来源, 因此自然条件下, 复配土体水分动态变化趋势与降雨 (>10 mm的有效降

雨)的变化趋势基本一致, 具明显的季节分布特征。自2014年7月—2015年8月期间土壤体积含水量整体呈现先剧烈增加后减小至平稳或小幅变化。在干旱和半干旱的气候区, 水分的年际、月际分布不均, 土壤水分的补偿和恢复主要在雨季, 由于2014年7月—9月降雨较多 (189 mm, 占全年降雨总量的70.68%), 所以2014年7月—9月复配土体土层储水量为观测期间的最高值, 其他时期各土体储水量一直处于较低水平。12月—翌年4月, 由于冬季降雪与蒸散能力弱, 土壤储水量得到一定补充。就全年平均储水量而言, 6种土体蓄水能力大小依次为L-S-PP > L-SW-PP > L-S-SP > L-W-PP > L-S > L, 与对照沙黄土相比, L-S-PP、L-SW-PP、L-S-SP、L-W-PP土体全年储水量分别高出13.00%、11.05%、9.65%、5.42%, L-S土体储水量大于L土体, 但差异不显著。

2.2 不同复配土体水分渗漏量的变化

由于各小区与周边隔绝, 且地下水位较深, 因此水平平衡分析中不考虑地下水和径流。根据土壤水分平衡公式可知渗漏量 $D=P-ET-\Delta W$, 由于大部分时间内蒸散试验数据的缺失, 此处主要分析8月9日—9月20日具有蒸散数据期间的水量平衡。由表2可知, 以砒砂岩为防渗层的L-S-SP土体表现出一



注：L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP、L-W-PP、L-S、L分别为沙黄土+砒砂岩+砒砂岩防渗层、沙黄土+砒砂岩+工程防渗布、沙黄土+砒砂岩+风化煤+工程防渗布、沙黄土+风化煤+工程防渗布、沙黄土+砒砂岩、沙黄土，下同 Note: L-S-SP, L-S-PP, L-SW-PP, L-S and L indicate sandy loess+soft sandstone, sandy loess+soft sandstone+weathered coal, sandy loess+weathered coal, sandy loess respectively, and the same below

图2 自然降雨条件下土壤储水量动态变化

Fig. 2 Temporal changes in average water storage in soil as affected by natural rainfall

表2 各土体水分平衡分析

Table 2 Soil moisture regime in soil relative to composition

处理 Treatment	储水量变化 Variation of water storage (mm)	蒸散 Evapotranspiration (mm)	降雨 Rainfall (mm)	渗漏 Leaching loss (mm)
L-S-SP	44.51	85.11	137.6	7.98
L-S-PP	52.46	86.89	137.6	-1.75
L-SW-PP	42.61	97.16	137.6	-2.17
L-W-PP	41.28	98.85	137.6	-2.53
L-S	21.60	79	137.6	37
L	19.51	98.09	137.6	20

定程度的渗漏（7.98 mm），但渗漏深度远小于没有防渗层土体，说明以砒砂岩为防渗层具有很好的可行性。以工程防渗布为防渗层的三种土体水分渗漏量为负值，考虑到田间条件下数据测量误差较难控制的特点，可以认为没有渗漏，说明工程防渗布完全防止了水分渗漏。没有防渗层的L土体和L-S土体均表现出了较程度的水分渗漏，分别为20 mm、37 mm，经砒砂岩改良L-S土体的渗漏量大于没有改良的L土体，其原因可能在于经砒砂岩掺混的土体中大孔隙比例远高于较为均质的沙黄土，导致较多的水分通过优先流快速到达底层进而流失。

2.3 不同复配土体土壤体积含水量的变异规律

变异系数（CV）多用来表征土壤水分的变化程度，变异系数越大，说明土壤水分变化越剧烈^[12]，也可以在一定程度上用来表征土体蓄水保墒能力，6种复配土体土壤体积含水量变异系数如图3所示。从图中可以看出，各复配土体剖面土壤体积含水量变异系数随深度逐渐减小，稳定性增强，土壤体积含水量水分变异均为中等变异。6种土体含水量均是表层最小（8.2%~10.2%），但变异系数最大（52%~71%），有明显的干燥化现象，反映了大气和自然降水对土壤水分的直接影响。在自然降雨

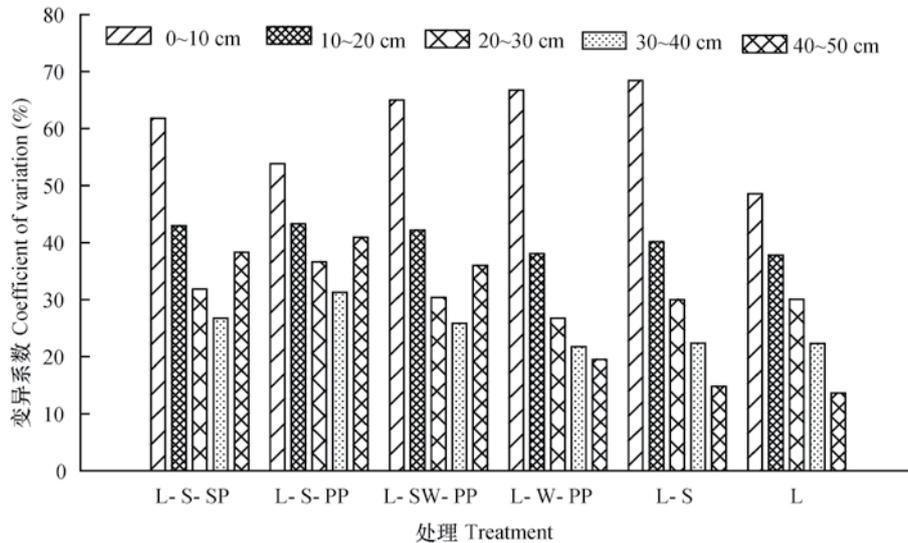


图3 复配土体土壤体积含水量变异系数剖面分布

Fig. 3 Distribution of variation coefficient of soil water content in the profile of reconstructed soil relative to composition

条件下, 由于降雨入渗、再分布和土壤蒸发向深层土体传递的滞后性, 各层土壤水分变化幅度具有一定差异, 浅层土壤(0~30 cm)水分变化幅度明显大于深层土壤(30~50 cm)。在0~40 cm的土层范围内质地改良+防渗层处理的L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP土体的变异系数随深度增加而显著降低, 40~50 cm出现了增大的现象。而L-W-PP、L-S、L土体在整个剖面0~50 cm土壤体积含水量变异系数随深度增加显著降低, 表明土体水分更加稳定, 水分的整体性、连续性更好。L处理表层0~10 cm年平均土壤体积含水量最低, 变异系数最小, L土体剖面CV值随深度加深呈平稳减小趋势, 50 cm深度平均体积含水量约为15%, 变异系数最小。与L土体相比, 由于防渗层的存在, L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP剖面土壤体积含水量变异系数随土壤深度的增加呈现“先降后升”趋势。

2.4 土壤体积含水量剖面分布

土壤剖面年平均体积含水量如图4所示。可以看出, 6种土体水分均呈现“增—减—增”趋势, 0~30 cm剖面土壤体积含水量随土壤深度的增加而提高, 且增幅明显, 最大值出现在40~50 cm底层(17.4%~18.9%), 剖面水分分布状况也体现了复配土体较强的蓄水保墒能力。L-S与L相比, 除0~10 cm表层外, 由于不同深度间土壤体积含水量相关性很强, 其他层次水分变化两种土体较为一致, 而各剖面土壤体积分水量的绝对值L-S要较L高3%~34%, 而在0~20 cm层次L-S-SP、L-S-PP

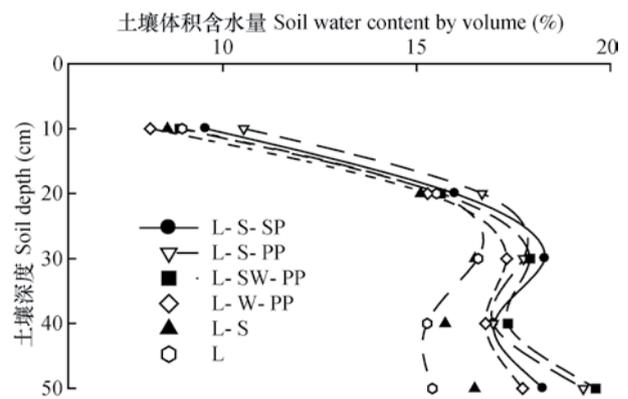


图4 土壤剖面年平均体积含水量

Fig. 4 Average annual soil water contents of the soil profiles

较L土体高3.04%~17.76%, 其余土体0~20 cm体积含水量均低于沙黄土。6种复配土体40~50 cm底层土壤体积含水量大小依次为L-SW-PP>L-S-PP>L-S-SP>L-W-PP>L-S>L。

2.5 土壤体积含水量时空变化规律

土壤剖面体积含水量随时间变化如图5所示。各复配土体不同深度土壤水分随时间分布具有较高的一致性, 呈现7月—9月最高的单峰状态, 降雨发生时, 各复配土体剖面土壤水分均呈现上升趋势, 其中表层土壤体积含水量增幅最明显。由于土壤水分的滞后效应, L-S-PP与L-SW-PP土体底层40~50 cm剖面水分并没有在9月份达到最大值, 而在10月份达最大值。11月以后呈微弱的波浪式稳定状态, 一方面与同时期降雨稀少而温度降低蒸散

较弱有关,另一方面可能是因为季节性冻土土壤水分形态^[13]、运动状态发生改变而保持稳定^[14]。0~30 cm层次受近地面影响较大,表现出相同的变化趋势,但土壤体积含水量绝对值随着深度增加呈缓慢增加趋势。由于9月份降水量最大,因此土壤体积含水量最大值出现在9月份(30.19%),最低值出现在6月(9.27%,低于萎蔫系数10%),两者相差20.92%,该层体积含水量变化幅度较

大。从年际尺度而言该层土壤体积含水量均维持在15.72%~29.66%左右,6种复配土体0~30 cm土层年平均土壤体积含水量大小依次为L-S-PP>L-S-SP>L-SW-PP>L>L-W-PP>L-S,说明复配土体近地面土壤表层蓄水保墒能力的差异,与L土体相比,L-S-PP、L-S-SP、L-SW-PP土体相同层次土壤体积含水量高出对照9.57%、6.84%、3.36%,而0~10 cm层次风化煤添加的土体L-SW-

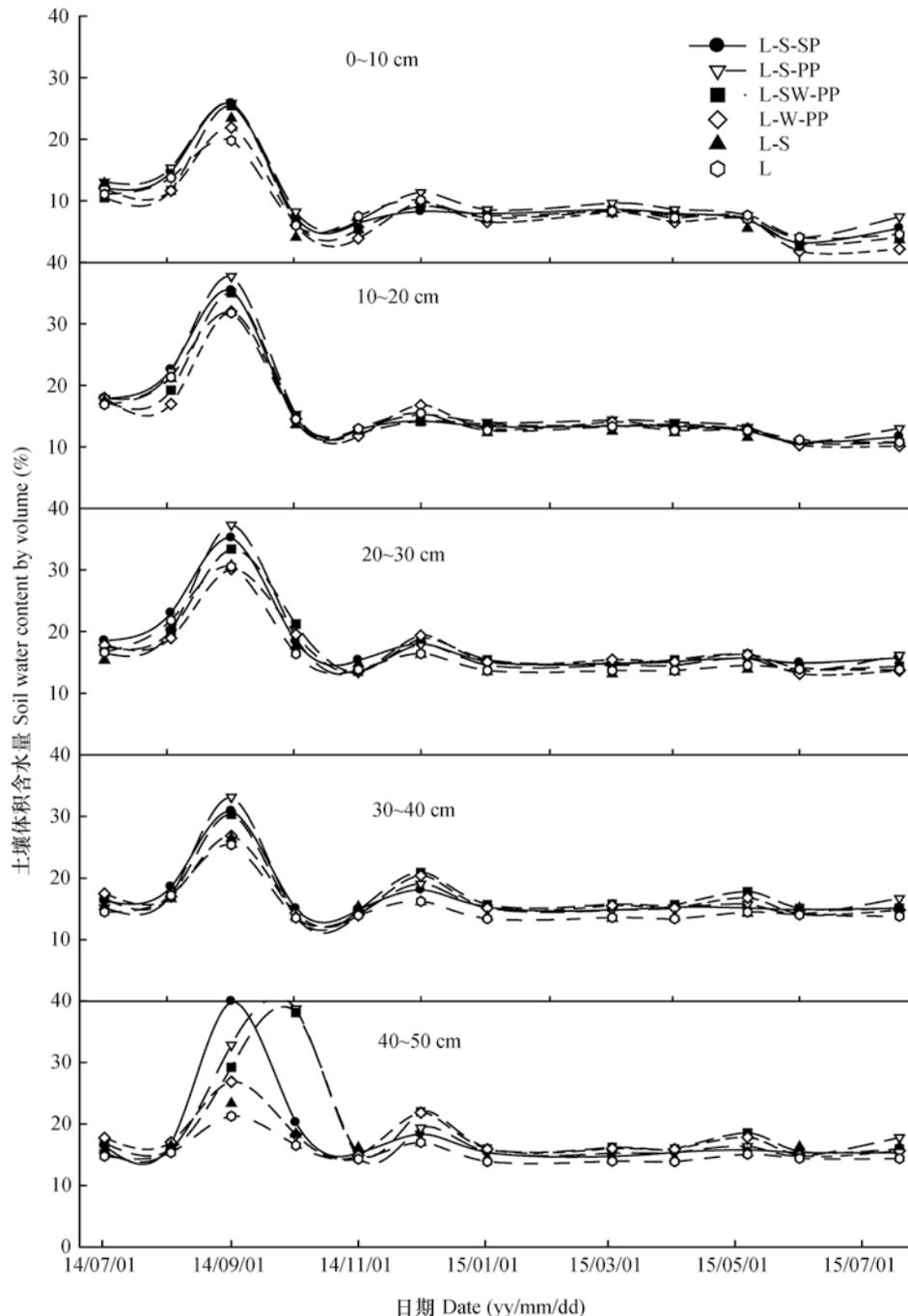


图5 土壤体积含水量时空分布

Fig. 5 Distribution of soil water content by volume in the soil profile

PP (8.08%)、L-W-PP (8.12%) 土壤体积含水量更是低于L土体 (8.95%)，且在雨季差异显著。

与L土体相比，L-S土体0~30 cm土层土壤体积含水量无显著差别。各土体30~40 cm土层土壤体积含水量大小依次为L-SW-PP>L-S-SP>L-S-PP>L-W-PP>L-S>L，与L土体相比，L-SW-PP、L-S-PP、L-S-SP、L-W-PP、L-S土体依次高出13.65%、11.32%、11.16%、9.89%、3.04%。30~40 cm土层水分相对于表层土体而言，土体水分受季节影响幅度变小，其对自然降水的响应也表现出一定的滞后性。L-SW-PP与L-S-PP两者30~50 cm土层土壤体积含水量相差2.07%~2.49%，并无显著差异。而对底层40~50 cm而言，土体对近地面状况、自然降水的响应滞后性最为明显，在无下层水分上行补给的情况下，剖面土壤体积含水量主要取决于防渗层，6种土体40~50 cm土层土壤体积含水量大小趋势基本与30~40 cm土层保持一致，L-SW-PP、L-S-SP、L-S-PP、L-W-PP、L-S土体分别较L土体高出27.37%、25.30%、18.56%、15.16%、7.09%，底层明显出现了“积水”现象（田间持水量为18.1%左右），L-SW-PP、L-S-SP、L-S-PP、L-W-PP处理土体40~50 cm层次土壤体积含水量在雨季过后缓慢增大并蓄积长达2个月时间，并且在夏季失墒期积水作用更为明显，这使得复配土体能够在自然降雨时较沙黄土贮存更多的水分，以供作物后续利用。

3 讨论

3.1 质地改良对土体剖面水分含量分布的影响

总体而言，土壤剖面体积含水量从表层至深层表现为增长型，即含水量随深度的增加而升高。关于水分和土壤水分变异的关系，目前大多数学者认为土壤水分变异与含水量呈负相关关系^[15-16]，本试验中土壤水分空间分布变异主要集中于土壤体积含水量较低的表层土体，这与张继光等^[17]、王晓燕等^[18]研究结果一致，剖面上层土体相对于下层（含水量较高）变异较大，也符合一般土体的变异规律^[13, 19]。沙黄土质地较粗，渗漏损失快^[20]、蒸发强^[11]、持水弱^[6]而导致水分含量绝对值较低，水分的整体性较强，说明沙黄土难以单独成为排土场最优构型土体。

砒砂岩和风化煤添加改变了土体原有的土壤结构，而不同土壤结构下影响水分分布的主控因素不同^[21]，土壤水力学性能发生改变，导致土壤剖面水分含量的改变^[22-24]，研究中表现为复配土体L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP处理剖面土壤体积含水量高于对照L土体，年际储水量更是较L土体高出9.65%~13%。试验中L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP处理土体0~30 cm水分含量高于L土体，在30~40 cm层次5种复配土体土壤体积含水量均高于L土体。土体中矿物类型变化是土壤剖面水分差异的主要原因，砒砂岩矿物组成含有约30%的蒙脱石^[25]，蒙脱石是一种2:1型硅酸盐亲水矿物，表面亲水基团与水结合后以层间水形式存在，因此相对于沙黄土其持水能力得到增强，从而在复配土体与沙黄土剖面上产生土壤水分微域性差异，表现为有砒砂岩掺混的土体剖面土壤体积含水量（特别是10~30 cm层次）高于沙黄土。

研究中土体储水量随降雨量的变化而波动，复配土体L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP显著高于L土体，表现出良好的保水蓄水潜质。沙黄土砂粒含量高毛管作用较弱^[26]，所以L土体持水性能较差，年际储水量最小。一般认为0~30 cm^[27]或0~20 cm^[28]剖面水分存在极大的空间自相关性即土层水分更容易受到相邻区域的影响。对浅层土体而言，土壤水分含量完全取决于自然降雨和近地面潜在蒸发。本研究中0~20 cm层次，土壤体积含水量为L-S-PP>L-SW-PP，L-W-PP>L，复配土体L-W-PP、L-SW-PP表层土体大多数月份处于土壤萎蔫系数（10%）以下，说明风化煤添加减少了土体表层含水量。虽然一些学者认为风化煤会增加土壤水稳性团聚体和活性官能团含量^[29-30]，但并未考虑风化煤的物理增温效应导致水分的损失。风化煤添加后，黑色质风化煤在强辐射下的物理增温效应，导致风化煤作为改良材料可能促进土体表面蒸发不利于土体蓄水保墒。

3.2 防渗层对土体水分效应的影响

在隔绝外部环境的独立土壤生态系统中，降雨较少无其他外部水分补给，土壤毛管水运动剧烈致土壤水分大量蒸发，导致土壤剖面水分运动主要以蒸发引起的土壤水势梯度为主，由于上层土体受外界环境影响大，土壤剖面所受环境影响程度随深度增加而减弱^[31-32]，所以0~30 cm层次土壤水分效应差异反映了土壤水力学性质的差

异, 30~50 cm层次土壤水分差异反映了防渗层的影响。从底层防渗效果来看, 30~50 cm剖面L-S-SP、L-S-PP土体两者相差0.5%, 无显著差异, 说明致密的砒砂岩防渗层和工程防渗布在蓄积水分效果方面无差异。复配土体L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP的0~40 cm土层剖面及L-W-PP、L-S、L土体整个剖面土壤体积含水量变异随深度增加有下降趋势, 均呈中等变异特征, 土体水分变异系数较大, 说明相对平均含水量的分布不均, 而防渗层处理的L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP、L-W-PP土体剖面40~50 cm土壤体积含水量平均较L土体高出21.60%, 含水量绝对值范围为17.74%~19.62%。4种防渗层复配土体变异系数在36.01%~40.96%之间, L土体变异13.65%, 变异复配土体变异系数较大主要是40~50 cm积水所致, 表明具有防渗层的复配土体能够在降雨等入渗水补给期有效截留水分。试验期间, L-S-SP、L-S-PP、L-SW-PP、L-W-PP处理土体平均土壤体积含水量在15.05%~16.25%之间, 显著高于L土体, 而L-S与L土体差异不显著, 说明在当地特殊的气候条件下, 土体防渗层蓄水措施相对于砒砂岩、风化煤的质地改良更加有效。对土体全年储水量而言, 防渗层复配土体L-S-SP、L-SW-PP、L-W-PP、L-S-PP显著高于无防渗层处理的L和L-S土体(73 mm), 说明复配土体能有效提高土壤水分含量, 增加土壤储水量, 为“土壤水库”水分保蓄和植被生长水分调节提供了基础条件, 是干旱半干旱地区生态恢复、土地复垦的关键。从土体稳定性、蓄水保墒效果来看, 防渗层处理、砒砂岩改良同时实施的土体(即L-S-PP、L-S-SP土体)具有水分高效利用的潜质。

4 结 论

6种复配土体土壤体积含水量剖面分布具有明显的季节特征, 含水量剖面分布主要受降雨、蒸散、防渗层的影响, 呈现雨季7月—9月较高的单峰状态。在水分条件较差的砒砂岩区, 截留水分的防渗层和储蓄水分的砒砂岩是新构土体的保水措施, 砒砂岩增强了土体剖面的持水蓄水能力, 0~30 cm砒砂岩掺混的土体含水量较沙黄土高8.21%, 即相对于沙黄土, 新构土体的保水能力得到提高。风化煤掺混增大了土体表层水分损失, 这可能与风化煤

增加土体大孔隙比例、物理增温致蒸发强烈有关, 从水分高效利用方面考虑复配方案, 需谨慎考虑风化煤作为改良材料的可行性。防渗层起到了蓄积水分作用, 使土体底层(主要是30~50 cm)水分变异增大, 有防渗层处理的复配土体年际储水量平均较对照高9.89%, 在干旱半干旱地区, 防渗层在雨季蓄积保持水分效果较质地材料更加有效。综合而言, 砒砂岩改良和防渗层2种保水措施均采用的L-S-PP或L-S-SP土体具有水分高效利用的潜质。

参 考 文 献

- [1] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14—18
Wang Y C, Wu Y H, Kou Q, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 14—18
- [2] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报, 2012, 32(16): 4961—4968
Yao X L, Fu B J, Lü Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 4961—4968
- [3] 摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性. 农业工程学报, 2014, 30(14): 115—123
She X Y, Zhang X C, Wei X R. Improvement of water absorbing and holding capacities of sandy soil by appropriate amount of soft rock (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 115—123
- [4] 罗林涛, 程杰, 王欢元, 等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征. 水土保持学报, 2013, 27(4): 58—61, 66
Luo L T, Cheng J, Wang H Y, et al. Nitrogen leaching characteristics in the compound soil of feildspathic sandstone and sand under corn conditions (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 58—61, 66
- [5] 李娟, 韩霁昌, 李晓明. 砒砂岩与沙复配成土对小麦光合生理和产量的影响. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 203—209
Li J, Han J C, Li X M. Effects of remixed soil with soft rock and sand on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat (In Chinese). Journal of Triticeae

- Crops, 2014, 34 (2): 203—209
- [6] 吴奇凡, 樊军, 杨晓莉, 等. 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟. 土壤学报, 2015, 52 (6): 1280—1290
- Wu Q F, Fan J, Yang X L, et al. Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6): 1280—1290
- [7] 赵宣, 韩霁昌, 王欢元. 砭砂岩与沙复配土生地、熟地中土壤有机碳及水稳性团聚体含量的变化特征. 安徽农业科学, 2015, 43 (11): 75—77, 80
- Zhao X, Han J C, Wang H Y. Variation characteristics of organic carbon and water stable aggregate of feldspathic sandstone and sand compound soil between raw land and cultivated land (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43 (11): 75—77, 80
- [8] 李娟, 韩霁昌, 张卫华, 等. 砭砂岩与沙复配土壤的物理性状和相关光谱特性. 麦类作物学报, 2015, 35 (3): 394—401
- Li J, Han J C, Zhang W H, et al. Research on physical properties and related spectral characteristics of composited soil with feldspathic sandstone and sand (In Chinese). *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35 (3): 394—401
- [9] 张露, 韩霁昌, 王欢元, 等. 砭砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化. 中国水土保持科学, 2015, 13 (2): 44—49
- Zhang L, Han J C, Wang H Y, et al. Grain size composition change after feldspathic sandstone and aeolian sandy soil compounding (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13 (2): 44—49
- [10] 马力, 张志国, 杜娥. 运动场草坪砂基坪床剖面水分特性研究. 土壤学报, 2006, 43 (5): 879—883
- Ma L, Zhang Z G, Du E. Water regime of profile of sand-base under sports turf (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (5): 879—883
- [11] 张磊, 齐瑞鹏, 张应龙, 等. 砭砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响. 土壤学报, 2015, 52 (1): 77—86
- Zhang L, Qi R P, Zhang Y L, et al. Effects of amendment of aeolian sandy soil and loess with soft sandstone on soil water retention curve and evaporation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (1): 77—86
- [12] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 1999, 89 (1/2): 1—45
- [13] 王子龙, 付强, 姜秋香, 等. 季节性冻土区不同时期土壤剖面水分空间变异特征研究. 地理科学, 2010, 30 (5): 772—776
- Wang Z L, Fu Q, Jiang Q X, et al. Spatial variability of soil moisture profile in seasonal frozen soil region in different stages (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30 (5): 772—776
- [14] Ford T W, Harris E, Quiring S M. Estimating root zone soil moisture using near-surface observations from SMOS. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18: 139—154
- [15] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异. 生态学报, 2008, 28 (12): 6334—6343
- Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of karst hilly region (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (12): 6334—6343
- [16] 张继光, 苏以荣, 陈洪松, 等. 典型岩溶洼地土壤水分的空间分布及影响因素. 生态学报, 2014, 34 (12): 3405—3413
- Zhang J G, Su Y R, Chen H S, et al. Research on spatial distribution and influencing factor of soil moisture in typical depression area of karst region (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (12): 3405—3413
- [17] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 湿润和干旱条件下喀斯特地区洼地表层土壤水分的空间变异性. 应用生态学报, 2006, 17 (2): 2277—2282
- Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. Spatial variability of surface soil moisture content in depression area of karst region under moist and arid conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (2): 2277—2282
- [18] 王晓燕, 陈洪松, 王克林, 等. 不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究. 水土保持学报, 2006, 20 (2): 110—113, 173
- Wang X Y, Chen H S, Wang K L, et al. Spatio-temporal dynamic change of soil water in sloping land with different use modes in red soil region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (2): 110—113, 173
- [19] 刘春利, 邵明安. 六道沟流域典型坡面不同土地利用方式下土壤水分动态变化研究. 中国生态农业学报, 2006, 14 (4): 54—56
- Liu C L, Shao M A. Soil hydraulic properties and their influences on soil water content under different land uses in Liudaogou watershed of Loess Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006,

- 14 (4): 54—56
- [20] 郭德亮, 胡伟, 樊军, 等. 黑河中游绿洲不同景观单元表层土壤水分空间变异性. 中国水土保持科学, 2013, 11 (2): 25—32
Guo D L, Hu W, Fan J, et al. Spatial variability of surface soil moisture under different landscape units in the Heihe Oasis (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11 (2): 25—32
- [21] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究. 农业工程学报, 2005, 21 (8): 11—16
Hu W, Shao M A, Wang Q J. Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (8): 11—16
- [22] 潘云, 吕殿青. 土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究. 灌溉排水学报, 2009, 28 (2): 59—61, 77
Pan Y, Lü D Q. Effects of soil bulk density on characteristics of soil infiltration (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28 (2): 59—61, 77
- [23] Zhao Y, Peth S, Wang X Y, et al. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-aridsteppe. Hydrological Processes, 2010, 24 (18): 2507—2519
- [24] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. Journal of Hydrology, 1998, 210 (1/4): 259—281
- [25] 叶浩, 石建省, 李向全, 等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析. 地球学报, 2006, 27 (2): 145—150
Ye H, Shi J S, Li X Q, et al. The effect of soft rock lithology upon its anti-erodibility (In Chinese). Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27 (2): 145-150
- [26] 韩霖昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究. 中国土地科学, 2012, 26 (8): 87—94
Han J C, Liu Y S, Luo L T. Research on the core technology of remixing soil by soft rock and sand in the Maowusu sand land region (In Chinese). China Land Sciences, 2012, 26 (8): 87—94
- [27] 杨泉, 赵成章, 史丽丽, 等. 祁连山地甘肃臭草斑块土壤水分的空间自相关分析. 生态学杂志, 2014, 33 (3): 716—722
Yang Q, Zhao C Z, Shi L L, et al. Spatial autocorrelation analysis on soil moisture of *Melica przewalskyi* patch in a degraded alpine grassland of Qilian Mountains, Northwest China (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2014, 33 (3): 716—722
- [28] Western A W, Zhou S, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. Journal of Hydrology, 2004, 286: 113—134
- [29] 李华, 李永青, 沈成斌, 等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究. 农业环境科学学报, 2008, 27 (5): 1752—1756
Li H, Li Y Q, Shen C B, et al. Physicochemical properties of reclaimed soil with weathered coal in open cast mining areas of Loess Plateau (In Chinese). Journal of Agro-environment Science, 2008, 27 (5): 1752—1756
- [30] 郝艳玲, 范福海, 司长庚. 风化煤对Ni(II)的吸附性能研究. 应用化工, 2005, 34 (4): 234—236
Hao Y L, Fan F H, Si C G. Study on the adsorption characteristics of the weathered coal for Ni(II) (In Chinese). Applied Chemical Industry, 2005, 34 (4): 234—236
- [31] 李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析. 应用生态学报, 2003, 14 (4): 515—519
Li H J, Wang M B, Chai B F. Spatial and temporal characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (4): 515—519
- [32] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. 水科学进展, 2012, 23 (3): 310—316
Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau (In Chinese). Advances in Water Science, 2012, 23 (3): 310—316

Study on the Water Retention Effect of Earth Disposal Site's Soil Reconstruction in Soft Sandstone Region

REN Zhisheng¹ SHEN Weibo^{1, 2} XIE Qian¹ WANG Tongtong¹ ZHENG Jiyong^{1, 2†} ZHANG Xingchang^{1, 2}

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 The Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent region is one of the most important coal energy bases in China, and also one of those the most fragile in ecology. In recent years, the ecological system and the landform therein has been severely and widely destructed as a result of the environment of opencast coal mining, which has also triggered a series of ecological and safety crises. And then how to rapidly and effectively improve the reconstructed soil (especially in soil water holding capacity) on a large scale at overburden disposal sites formed during coal mining has become an important scientific problem to land reclamation and ecosystem restoration. At present, the soil in these sites has some main problems, that is, relatively thin in soil layer (less than 50 cm), and relatively coarse in texture, (over 70%, sands 0.02 ~ 2 mm in particle size), which means that the soil is rather low in water holding capacity. Besides, in the arid and semi-arid region, the precious soil moisture is mostly lost through evaporation and leakage. To save as much as possible soil water from evaporating and leaching, a series of measures are designed and adopted, such as incorporating soft sandstone, which contains about 30% of montmorillonite and weathered coal into the local sandy loess, and spread a layer of soft sandstone or a water-proof plastic sheet underneath the soil to prevent water leaching. 【Method】 In order to investigate dynamics of soil moisture content in reconstructed soils relative to composition pattern (sandy loess, soft sandstone, weathered coal) and impervious layer (soft sandstone or plastic sheet), an experiment was carried out, designed to have 6 treatments and 3 replicates for each treatment, making up a total of 18 experimental plots. 【Result】 Results show as follows. (1) The overburden disposal sites are subject to a wet season (July-October) and a dry season (November-June) in a year as affected by the climate in the region, and natural rainfall, evapotranspiration and leaching are the main factors affecting the soil moisture content therein; (2) During the wet season when rainfall is rich, the effect of the existence of a impervious layer was significant, raising soil moisture content by 9.65% ~ 13% in the soil body as a whole ($p < 0.05$, the same below) and by 21.6% in the bottom layer as compared with their respective treatments without the layer, but no significant difference was observed between the treatments with soft sandstone as impermeable layer and the treatments with plastic sheets in the effect. However, on the other hand, the existence of an impervious layer weakened temporal and spatial stability of soil moisture, especially in deep soil layers; (3) Incorporation of weathered coal increased soil water loss through surface evaporation, which is no good to improving soil water holding capacity, while incorporation of soft sandstone affected soil water holding capacity reversely. So in the practice, it still calls for further study on feasibility of the use of weathered coal as soil amendment from the view point of efficient utilization of water sources. Incorporation of soft sandstone increased soil water content by 3.36% ~ 9.57% in the 0 ~ 30 cm layer and 11.16% ~ 13.65% in the 30 ~ 40 cm layer. In addition, laying of an impervious layer is more effective than incorporation of soft sandstone and/or weathered coal in increasing water content of the

artificial soils in the overburden disposal sites. **【Conclusion】** To sum up, incorporation of soft sandstone significantly enhances the soil water retention and water holding capacity of the soil, and the impervious layer effectively controls soil water leaching and hence has a positive effect on soil holding water like a reservoir. Besides illustrating the effects of the soil amelioration measures on spatial and temporal variation of soil moisture content and the improvement of soil water regime, the study provides some references for choosing schemes for reconstruction of farmland soil using different components in mining areas.

Key words The Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent region; Soft sandstone; Earth disposal site; Soil reconstruction; Soil water content by volume

(责任编辑：檀满枝)