

高潜水位矿区不同复垦方式下土壤热导率及其影响因素

闵祥宇, 李新举

(山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 以东部高潜水位采煤塌陷复垦耕地为研究对象, 研究挖深垫浅复垦、充填复垦、预复垦3种复垦方式下土壤热导率的分布及原因。在3种复垦方式典型样地上开挖剖面, 分别取0—20, 20—40, 40—60 cm土层土样, 经实验分析观测土壤热导率及相关物理指标。结果表明: (1) 复垦方式、剖面层次和二者交互作用均是使热导率产生显著差异的因素 ($p < 0.01$), 对土壤热导率总体变异的贡献率分别为86.8%, 89.6%, 71.9%; (2) 土壤热导率随土壤剖面深度增加呈先增加后降低的“>”型变化趋势; (3) 复垦可以显著 ($p < 0.05$) 影响土壤热导率大小, 并增加其在不同剖面层次上分布的差异; (4) 在含水量和温度差异不大的条件下, 土壤容重在1.205~1.593 g/cm³时, 砂粒含量为影响热导率的主要因素, 当土壤容重在1.604~1.813 g/cm³时, 容重为影响热导率的主要因素。与未塌陷耕地相比, 复垦土壤热导率偏低, 在土层间分布差异性增加, 因此应综合考虑容重和质地, 从降低土壤容重的角度入手, 改良复垦土壤热导率。

关键词: 高潜水位矿区; 复垦土壤; 复垦方式; 土壤热导率

中图分类号: S153.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0176-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.030

Soil Thermal Conductivity and Influencing Factors Under Different Reclamation Modes in a Mining Area with High Groundwater Level

MIN Xiangyu, LI Xinju

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018)

Abstract: Taking coal mining subsidence farmland with high groundwater level as the research object, the distribution of soil thermal conductivity and the influencing factors under three different reclamation modes, including regional leveling reclamation, filling reclamation, and dynamic reclamation were studied. In this research, soil profiles of three layers, i. e. 0—20 cm, 20—40 cm, and 40—60 cm, were dug in typical areas under three different reclamation modes. After collecting soil samples, soil thermal conductivity and other relevant physical indicators were acquired through experiments. The results indicated that reclamation mode, profile layer, and their interactions were the factors making the soil thermal conductivity different significantly ($p < 0.01$), and the contribution rate was 86.8%, 89.6%, and 71.9%, respectively. The changing trend of the soil conductivity showed a pattern of “>” with the increasing of soil depth. Reclamation could influence soil thermal conductivity significantly ($p < 0.05$), and increase its differentiation of distribution among soil layers. Under the same conditions of soil water content and temperature, soil silt content was the main factor affecting soil thermal conductivity when soil bulk density was between 1.205 g/cm³ and 1.593 g/cm³, while soil sand content was the main factor when soil bulk density was between 1.604 g/cm³ and 1.813 g/cm³. Thermal conductivity of reclaimed soils was lower than that of the normal soil, and its differentiation of distribution among soil layers was higher. Therefore, in order to improve thermal conductivity of reclaimed soils, soil bulk density and texture should be taken into consideration comprehensively, and soil bulk density should be reduced.

Keywords: mining area with high groundwater level; reclaimed soils; reclamation modes; soil thermal conductivity

从 2000 年起,国家每年投入数十亿元进行采煤塌陷耕地复垦工作^[1],这对保护我国耕地数量和粮食安全有重要意义。但复垦耕地质量偏低目前仍是棘手且严峻的问题^[2-4],因此复垦耕地土壤质量引起越来越多的学者的重视。国内外学者在复垦土壤质量研究方面取得巨大成就。王平等^[5]在山西平朔矿区对土壤水力特征进行了详细研究,发现与原地貌相比,塌陷土壤水力特征发生波动性变化,但复垦土壤的水力特征与原地貌没有明显差异;李鹏等^[6]对矿区复垦土壤有效微量元素进行了研究,发现在复垦 8 a 后,复垦土壤中微量元素接近自然水平;梁利宝等^[7]在复垦 1 a 的复垦样地上研究不同培肥处理下土壤养分的变化,发现不同培肥处理均不同程度增加土壤中各养分含量,其中施用有机肥最为有效的增加土壤有机质和微生物量氮含量;Gypser 等^[8]在德国褐煤露天开采矿区对藻类植物的保水特征研究发现,地衣植物的结皮可有效的提高土壤的持水能力;Mukhopadhyay 等^[9]在矿渣充填的土地上研究不同树种种植下的根系土壤生物量和碳密度,发现与非根系土壤相比,根系土壤生物量碳含量偏高,且脱氢酶活性较高;Das 等^[10]在采煤矿区研究复垦后土壤和未复垦土壤无机碳、生物碳和煤固定碳的含量,发现复垦后土壤无机碳和生物碳所占总碳的比例更高,但未复垦土壤中煤固定碳所占总碳的比例更高。

目前对复垦土壤质量的研究,主要针对土壤水和肥力等相关指标进行研究,而复垦土壤与普通土壤在土壤质量方面的差异,主要在于复垦土壤环境在复垦过程中发生了变化,土壤环境包括水、肥、气、热 4 大因子,土壤热性质是重要组成,其中土壤热导率即土壤透热性又是衡量土壤热性质的重要参数,即是土壤热量传输和贮存的控制因子,又影响着土壤水气盐的耦合运动以及土壤水分的蒸发^[11],因此,复垦土壤热

导率一定程度上反映复垦土壤质量,是土壤中水气运动等过程的决定参数,对作物的生长也有影响。

而对土壤热导率的研究仅少数出现在高寒冻土区,且主要是对热导率的模拟进行研究^[11-14],但针对矿区该参数的研究尚未见报道。本研究针对东部高潜水位矿区复垦土壤热导率进行研究,一方面为复垦土壤热导率状况提供基础数据,为复垦土壤质量评价提供新方向;另一方面找到影响土壤热导率的因素,为提出土壤改善措施提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省济宁市境内,地理坐标为北纬 34°26′—35°57′,东经 115°52′—117°36′,属暖温带半湿润季风气候区,煤碳资源丰富,已探明煤碳储量 2.7×10¹⁰ t,地下潜水位高,采煤塌陷地易积水。目前根据塌陷程度不同,形成以挖深垫浅复垦、充填复垦和预复垦为主的复垦模式。挖深垫浅复垦适用于塌陷较浅的塌陷区,仅在研究区域内进行简单的土地平整、挖高填低等工程措施;充填复垦适用于塌陷较深的塌陷区,因塌陷较深需要充填物填充;预复垦是在塌陷区未稳沉之前开始复垦的动态过程,在表土沉入积水前进行剥离而恢复更多的土地^[15]。

选择不同复垦方式复垦 1 a 的复垦区为供试样地,分别为唐阳煤矿复垦区,复垦方式为挖深垫浅复垦,仅利用小型机械进行整平,表层砂砾较多;许厂煤矿复垦区,复垦方式为充填复垦,复垦前进行表土剥离,充填物为复垦区附近某地深层土,土地较为平整,但受到机械碾压的影响土壤偏紧实;2 号井煤矿复垦区,复垦方式为动态预复垦,复垦过程中受到机械反复碾压,土壤也较为紧实,并分别以各自周边未塌陷耕地为对照。各样地基本状况见表 1。

表 1 样地基本概况

供试样地	复垦方式	地理位置	利用类型	复垦高程/m	紧实度/kPa	土壤类型	pH
唐阳煤矿复垦区	挖深垫浅复垦	35°37′20.7″N,116°31′58.98″E	耕地	40	1013	褐土	7.2
许厂煤矿复垦区	充填复垦	35°27′55.72″N,116°40′55.91″E	耕地	36	1782	褐土	6.9
2 号井煤矿复垦区	预复垦	35°20′10.61″N,116°37′32.69″E	耕地	37	1921	褐土	7.1

1.2 样品采集和处理

于 2016 年 6 月对 3 种不同复垦方式的复垦土壤分别开挖土壤剖面,以开挖后复垦土壤剖面的层次为划分依据,分 3 层进行取样,分别为 0—20,20—40,40—60 cm。取样前用 PC-2R 多通道土壤热性质记录仪观测土壤热导率;环刀取样,2016 年 7 月采用实验室内烘干法测量土壤体积含水量和容重^[16];Winner 2000 激光粒度分析仪进行土壤颗粒分析^[17],主要方法为将自然风干土样过 2 mm 筛,称取 0.5 g 土样,放入 20 mL

容量瓶中,加入 5 mL 的 0.25 mol/L 草酸钠溶液为分散剂,加蒸馏水定容至 20 mL,上下摇晃数次,将液体全部加入仪器加样槽内进行粒度分析。对照采用同样的处理方法,各处理重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 复垦土壤热导率分布

2.1.1 不同剖面层次土壤热导率 对于未塌陷的样地(CK),土壤热导率均随土壤剖面深度增加而增加;

但对于复垦后样地,土壤热导率随土壤剖面深度增加呈现出先增加后降低的“>”型变化(图 1)。复垦后耕地土壤热导率在剖面层次分布上有别于未塌陷耕地。

复垦样地各层次土壤热导率均低于未塌陷样地(CK),其中充填复垦和预复垦样地各层次土壤热导率与未塌陷样地(CK)对应层次土壤热导率差异显著($p<0.05$)。针对复垦样地,以 20—40 cm 心土层热导率较大,0—20 cm 表层和 40—60 cm 深层土壤热导率偏小,其中充填复垦和预复垦样地 0—20 cm 表层土壤热导率显著低于更深层土壤热导率($p<0.05$)。

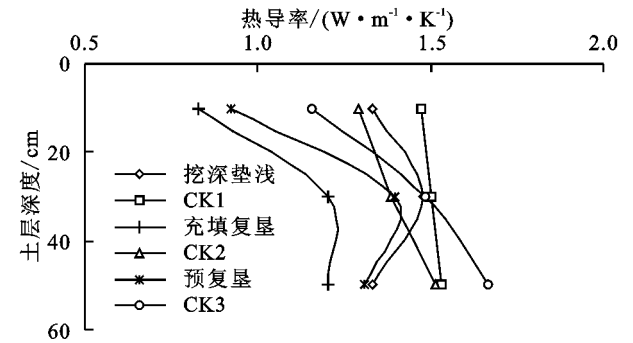


图 1 不同剖面层次土壤热导率

2.1.2 不同复垦方式热导率分布 由表 2 可知,挖深垫浅复垦、充填复垦和预复垦样地土壤热导率分别为 1.380,1.087,1.209 W/(m·K),其中充填复垦和预复垦样地土壤热导率较未塌陷样地低 19.59%和 18.77%($p<0.05$);挖深垫浅复垦样地土壤热导率较未塌陷样地低 8.91%,差异不显著。挖深垫浅复垦、充填复垦和预复垦样地不同剖面深度土壤热导率的变异系数(CV)均高于未塌陷样地,分别高出 30.16%,24.12%,13.94%,表明复垦可以显著影响复垦土壤热导率大小,并增加其在不同剖面层次上分布的差异。与对照相比,充填复垦样地土壤热导率大小的变化程度最大,其次为预复垦和挖深垫浅复垦;挖深垫浅复垦样地不同剖面深度土壤热导率的变异系数(CV)变化程度最大,其次为充填复垦和预复垦。表明在 3 种复垦方式之间,充填复垦更为明显的影响土壤热导率的整体大小,而挖深垫浅复垦更为明显的影响热导率在不同剖面层次上分布的差异性。

表 2 不同复垦方式土壤热导率

复垦方式	平均值/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	CV
挖深垫浅	1.380±0.09ab	0.063
CK1	1.503±0.07a	0.044
充填复垦	1.078±0.20c	0.199
CK2	1.397±0.23a	0.151
预复垦	1.209±0.22bc	0.208
CK3	1.436±0.23a	0.179

注:采用 LSD 检验,不同字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 复垦土壤热导率变异来源

由表 3 可知,复垦方式、剖面层次以及二者交互作用均为土壤热导率产生显著差别的变异来源($p<0.01$)。从偏 Eta 方统计结果来看,复垦方式、剖面层次及二者交互作用的偏 Eta 方分别为 0.868,0.897,0.716,表明复垦方式(86.8%),剖面层次(89.6%)和复垦方式×剖面层次(71.9%)均为土壤热导率总体变异的主要变异来源。在偏 Eta 方的大小比较上,剖面层次>复垦方式>复垦方式×剖面层次。说明复垦方式和剖面层次均会对复垦耕地土壤热导率造成影响,而在复垦施工中,不仅要注重复垦方式的选择,更要注重重构复垦土壤剖面。

表 3 热导率变异源分析

变异来源	df	均方	F	Sig.	偏 Eta 方
复垦方式	2	0.207	59.360 **	<0.001	0.868
剖面层次	2	0.271	77.727 **	<0.001	0.896
复垦方式×剖面层次	4	0.040	11.524 **	<0.001	0.719

注: $R^2=0.947$ (调整 $R^2=0.923$);**表示在 0.01 水平上极显著相关($p<0.01$)。下同。

2.3 复垦土壤热导率影响因素

作为土壤重要的热力学指标,土壤容重、质地、温度和含水量均为影响到土壤热导性能^[18]。由表 4 可知,根据数据的差异性,可把样地土壤质地(以砂粒含量表示)分成 7 个级别(47.35%,50.91%~52.14%,55.74%~59.17%,60.52%~62.33%,63.21%,65.80%,69.73%~71.86%);土壤容重分为 5 个等级(1.205~1.294 g/cm³,1.343~1.407 g/cm³,1.457~1.468 g/cm³,1.570~1.613 g/cm³,1.723~1.813 g/cm³);土壤体积含水量分为 2 个等级(27.68%~34.03%,34.27%~34.43%);土壤温度分为 2 个等级(25.2~25.6℃,25.7℃)。综合来看,样地质地和容重 2 大因子的差异较为明显,而体积含水量和温度基本处于同一水平。

2.3.1 不同因素对热导率的影响 对 4 大因素进行单变量方差分析(表 5),发现容重和砂粒含量会不同程度($p<0.01$)的影响土壤热导率,为土壤热导率的主要影响因素;体积含水量和土壤温度因差异不大,自由度较低,不是土壤热导率的主要影响因素;且容重和砂粒含量对热导率的影响并无交互作用。另外对各因素进行相关性分析(表 6),发现土壤砂粒含量与热导率间存在极显著相关性,相关系数 $r=0.676^{**}$ ($p<0.01$),其他各因素与土壤热导率的相关性不显著;而在不同因素之间,土壤容重与砂粒含量呈极显著负相关关系,相关系数 $r=-0.640^{**}$ ($p<0.01$),其他因素间不存在相关关系(见表 5)。

表 4 复垦土壤热导率影响物理因子

复垦方式	土层深度/cm	砂粒/%	容重/(g·cm ⁻³)	体积含水量/%	土壤温度/℃
挖深垫浅	0—20	60.52±1.09d	1.577±0.040b	29.72±1.79b	25.7±0.2ab
	20—40	65.80±0.48b	1.593±0.058b	28.84±2.26b	25.4±0.2ab
	40—60	61.46±2.56cd	1.570±0.037b	30.06±1.29b	25.7±0.1ab
CK1	0—20	63.21±1.03c	1.250±0.061de	29.72±1.86b	25.7±0.1ab
	20—40	70.31±1.10a	1.343±0.043d	30.12±1.57b	25.7±0.2a
	40—60	71.39±0.94a	1.382±0.031cd	27.68±2.14b	25.5±0.1ab
充填复垦	0—20	55.74±1.26e	1.604±0.125b	27.80±2.05b	25.4±0.2b
	20—40	47.35±1.63g	1.723±0.089a	28.11±0.25b	25.4±0.2b
	40—60	52.05±1.84f	1.728±0.092a	29.90±1.70b	25.4±0.2b
CK2	0—20	59.17±1.9de	1.205±0.023e	30.11±1.20b	25.6±0.2ab
	20—40	62.33±1.12cd	1.458±0.061c	30.26±1.24b	25.6±0.2ab
	40—60	71.02±1.50a	1.407±0.040cd	34.43±2.23a	25.2±0.5b
预复垦	0—20	56.80±0.55e	1.613±0.082b	33.97±1.95ab	25.6±0.2ab
	20—40	50.91±1.40f	1.813±0.026a	33.86±3.17ab	25.4±0.2b
	40—60	52.14±1.46f	1.738±0.023a	32.97±3.64ab	25.6±0.2ab
CK3	0—20	57.92±2.28e	1.294±0.029de	34.27±3.19a	25.7±0.1ab
	20—40	69.73±1.47a	1.406±0.023cd	34.03±2.60ab	25.5±0.3ab
	40—60	71.86±1.81a	1.468±0.034c	33.06±3.92ab	25.5±0.3ab

表 5 复垦土壤热导率影响因子单变量方差分析

影响因素	df	均方	F	Sig.
砂粒含量	5	0.077	18.989**	0.001
容重	3	0.046	11.353**	0.007
体积含水量	1	0.000	0.005	0.948
温度	0	—	—	—
砂粒含量×容重	2	0.013	2.934	0.119

注:R²=0.969(调整 R²=0.911)。

由图 2 可知,当容重>1.600 g/cm³ 时,容重与热导率成正比,热导率随容重的增加而升高;当容重<1.600 g/cm³,此时砂粒含量>55%时,砂粒含量

与热导率呈更好的正比关系,热导率随砂粒的增加而增加。

2.3.2 复垦土壤容重、砂粒含量与热导率的相关性 以容重=1.600 g/cm³ 为分界线,将土壤容重和砂粒含量分成两组数据。当样地土壤容重在 1.205~1.593 g/cm³(n=12)时,砂粒含量与热导率的相关系数r=0.904** (p<0.01),容重与热导率相关性不显著,两者相关系数r=-0.172。因变量(热导率 y)与自变量(砂粒含量 x₁)和(容重 x₂)的关系符合回归模型:

$$y=-0.192+0.023x_1+0.076x_2 \tag{1}$$

表 6 复垦土壤热导率影响因子间相关性分析

	热导率	容重	砂粒含量	体积含水量	土壤温度
热导率	1	-0.326	0.676**	0.104	-0.028
容重	-0.326	1	-0.640**	-0.014	-0.373
砂粒含量	0.676**	-0.640**	1	0.080	0.030
体积含水量	0.104	-0.014	0.080	1	-0.051
土壤温度	-0.028	-0.373	0.030	-0.051	1

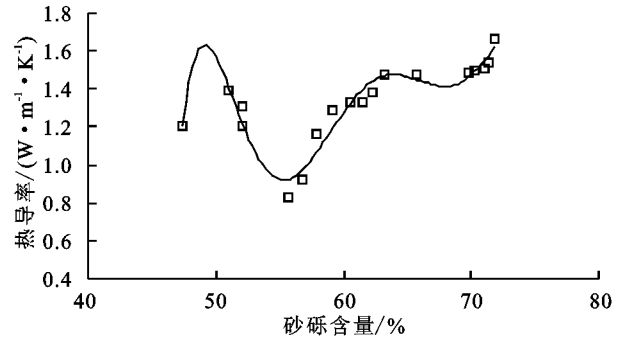
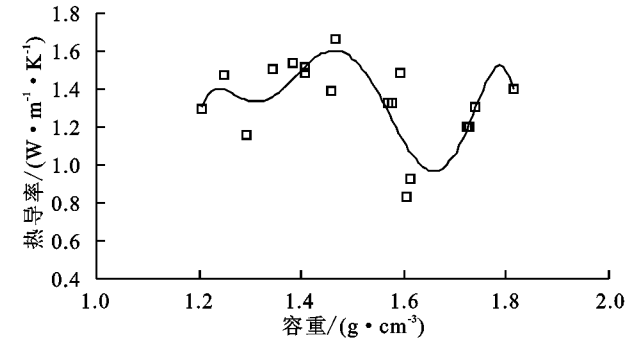


图 2 土壤容重、砂粒含量与热导率关系

模型的拟合度达到 90.6%,此时砂粒含量为热导率主要影响因素,对热导率的影响大小为 0.896,而容重对热导率的影响大小为 0.072。当样地土壤容重在 1.604~1.813 g/cm³(n=6)时,容重与热导率的相关系数r=0.980** (p<0.01),砂粒含量与热导率的相关性不显著,相关系数r=-0.728。因变量

(热导率 y)与自变量(砂粒含量 x₁)和(容重 x₂)的关系符合回归模型:

$$y=-3.351+2.667x_2 \tag{2}$$

模型的拟合度达到 98.0%,此时容重为热导率主要影响因素,对热导率的影响大小为 0.467,而砂粒含量对热导率的影响大小为 0.011(表 7)。

表 7 二元线性回归模型方差分析

	自变量	系数			模型		
		标准化系数	<i>t</i>	Sig.	<i>R</i>	<i>F</i>	Sig.
模型 1	砂粒含量 x_1	0.896	6.321	<0.001	0.906	20.722	<0.001
	容重 x_2	0.072	0.507	0.624			
模型 2	砂粒含量 x_1	0.011	-0.083	0.936	0.980	36.39	0.008
	容重 x_2	0.467	5.716	0.011			

3 讨论

土壤热导率受到土壤质地、土壤温度、土壤含水量和土壤容重等因素的影响。一方面,土壤质地会极大的影响土壤热导率,土壤质地越粗,砂粒含量越多,土壤热导率越大^[12],相关研究表明,砂土热导率约为壤土热导率的 1.5 倍^[19];另一方面,土壤容重也会影响土壤热导率,土壤越紧实,容重越大,热导率越大^[13,20],相关研究表明,当土壤处于干土状态,土壤越松散,土壤热导率越小^[21];另外,由于水分相变和温度的关系,土壤含水量和温度会综合影响土壤热导率^[11,14],相关研究表明,高温下土壤热导率是常温下的 3~4 倍^[22],主要是由于温度升高引起水分迁移,产生水分潜热传输效应,而当热导率达到一定值后,增加水分含量会减少水气扩散空间,反而会使土壤热导率下降^[23]。

针对研究区复垦样地,土壤质地和容重会对土壤热导率产生影响,但影响均非线性,只有当容重<1.600 g/cm³(砂粒含量>55%)时,土壤质地对热导率的影响呈线性,两者的相关系数 $r=0.904^{**}$ ($p<0.01$),此时自变量(砂粒含量 x_1)和(容重 x_2)对因变量(热导率 y)的影响公式为 $y=-0.192+0.023x_1+0.076x_2$;当容重>1.600 g/cm³ 时,土壤容重对热导率的影响占主导,两者的相关系数 $r=0.980^{**}$ ($p<0.01$),此时自变量(砂粒含量 x_1)和(容重 x_2)对因变量(热导率 y)的影响公式为 $y=-3.351+2.667x_2$ 。另外,针对研究区复垦样地,土壤体积含水量和土壤温度变化不大,不能成为影响土壤热导率的因素。这是因为对土壤热导率的相关研究多在高原冻土区,温差变化大,冻土中水分的凝结和融化过程易使土壤含水量从非饱和状态趋于饱和,造成土壤温度和含水量两大因素对热导率的影响较大,而该研究区处于东部暖温带季风气候区,样地复垦土壤含水量长期处于同一状态下,且同一时间内土壤温度处于同一水平,因此含水量和土壤温度很难成为影响复垦样地土壤热导率的因素。

综合来看,复垦土壤容重和砂粒含量为热导率的影响因素,其影响方式决定了热导率的分布,拟合数据可较好的模拟复垦土壤实际热导率的分布情况(图 3)。而复垦土壤容重一般偏大,考虑到实际情况,应当适当对复垦土壤采取松土措施,从降低土壤容重,松弛土壤(增加砂粒含量)的角度入手,改善土壤的热

导性能。

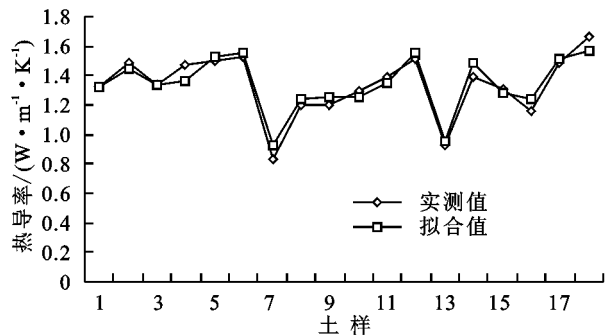


图 3 土壤热导率拟合

4 结论

(1)复垦方式、剖面层次和二者交互作用均是使热导率产生显著差异的因素($p<0.01$),对土壤热导率总体变异的贡献率分别为 86.8%,89.6%,71.9%,复垦施工中,不仅要注重复垦方式的选择,更要注重重构复垦土壤剖面。

(2)复垦土壤热导率随土壤剖面深度增加呈现出先增加后降低的“>”型变化。20—40 cm 心土层热导率较大,0—20 cm 耕作层和 40—60 cm 深层土壤热导率偏小。

(3)复垦土壤热导率低于对照耕地土壤热导率,且在不同剖面层次上分布的差异性偏大。与对照相比,充填复垦样地土壤热导率大小的变化程度最大,达到 19.59%;挖深垫浅复垦的变异系数(CV)变化程度最大,达到 30.16%。

(4)当含水量和温度差异不大时,质地和容重 2 大因子影响了复垦土壤热导率分布,当土壤容重在 1.205~1.593 g/cm³ 时,砂粒为影响热导率的主要因素,两者的相关系数 $r=0.904^{**}$ ($p<0.01$);当土壤容重在 1.604~1.813 g/cm³ 时,容重开始成为影响热导率的主要因素,其与热导率的相关系数 $r=0.980^{**}$ ($p<0.01$)。

参考文献:

- [1] 李新举,胡振琪,李晶,等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报,2007,23(6):276-280.
- [2] 李鹏,李占斌,张晓霞,等. 复垦土地土壤有效微量元素分布特征研究[J]. 水土保持学报,2011,25(3):126-130.
- [3] 王金满,杨睿璇,白中科. 草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型[J]. 农业工程学报,2012,28(14):229-235.
- [4] 樊文华,李慧峰,白中科,等. 黄土区大型露天煤矿煤矸石自燃对复垦土壤质量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(2):319-324.

- [5] 王平,王金满,秦倩,等.黄土区采煤塌陷对土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):297-304.
- [6] 李鹏,李占斌,张晓霞,等.复垦土地土壤有效微量元素分布特征研究[J].水土保持学报,2011,25(3):126-130.
- [7] 梁利宝,闫峰,许剑敏.不同培肥处理对采煤塌陷区复垦土壤氮素形态的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):262-266.
- [8] Gypser S, Veste M, Fischer T, et al. Infiltration and water retention of biological soil crusts on reclaimed soils of former open-cast lignite mining sites in Brandenburg, north-east Germany [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(1): 1-11.
- [9] Mukhopadhyay S, Masto R E, Cerdà A, et al. Rhizosphere soil indicators for carbon sequestration in a reclaimed coal mine spoil[J]. Catena, 2016, 141(6): 100-108.
- [10] Das R, Maiti S K. Importance of carbon fractionation for the estimation of carbon sequestration in reclaimed coalmine soils: A case study from Jharia coalfields, Jharkhand, India [J]. Ecological Engineering, 2016, 90(5): 135-140.
- [11] 刘杨,赵林,李韧.基于 SHAW 模型的青藏高原唐古拉地区活动层土壤水热特征模拟[J].冰川冻土,2013,35(2):280-290.
- [12] 李婷,王全九,樊军.土壤热参数确定方法比较与修正[J].农业工程学报,2008,24(3):59-64.
- [13] 原喜忠,李宁,赵秀云,等.非饱和(冻)土导热系数预估模型研究[J].岩土力学,2010,31(9):2689-2694.
- [14] 陆森,任图生,杨洪,等.多针热脉冲技术测定土壤热导率误差分析[J].农业工程学报,2010,26(6):20-25.
- [15] 胡振琪,肖武.矿山土地复垦的新理念与新技术:边采边复[J].煤炭科学技术,2013,41(9):178-181.
- [16] 中科院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:96-100.
- [17] 杨金玲,张甘霖,李德成,等.激光法与湿筛一吸管法测定土壤颗粒组成的转换及质地确定[J].土壤学报,2009,46(5):772-780.
- [18] Tang C W, Li Q J, Wang B B, et al. Research on Thermal Properties of ABS and ABS Composites[J]. Synthetic Materials Aging & Application, 2014, 25(3): 194-202.
- [19] 李毅,邵明安,王文焰,等.质地对土壤热性质的影响研究[J].农业工程学报,2003,19(4):62-65.
- [20] Lu S, Ren T S, Gong Y S, et al. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(1): 8-14.
- [21] 原喜忠,李宁,赵秀云,等.非饱和(冻)土导热系数预估模型研究[J].岩土力学,2010,31(9):2689-2694.
- [22] 刘晨晖,周东,吴恒.土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J].岩土工程学报,2011,33(12):1877-1886.
- [23] 陆森,任图生.不同温度下的土壤热导率模拟[J].农业工程学报,2009,25(7):13-18.

(上接第 175 页)

- [15] Zhao Y, Peth S, Horn R, et al. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 109(2): 75-86.
- [16] 高红贝,邵明安.温度对土壤水分运动基本参数的影响[J].水科学进展,2011,22(4):484-494.
- [17] Christopher M G, David J S. Soil temperature and moisture errors in operational eta model analyses[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(3): 367-387.
- [18] 张治,田富强,钟瑞森,等.新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J].农业工程学报,2011,27(1):44-51.
- [19] 李从娟,唐俊妍,高培,等.咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响[J].土壤学报,2015,52(5):1180-1187.
- [20] 原焕英,许喜.黄土高原半干旱丘陵沟壑区人工林土壤水分动态研究[J].西北林学院学报,2004,19(2):5-8.
- [21] 虎胆·吐马尔白,靳志锋,李文娟,等.北疆土壤温度变化对滴灌棉田水盐运移规律的影响研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):217-221.
- [22] 崔乐乐,赵英,易军,等.黑河中游农田荒漠过渡带土壤冻融过程中水热动态[J].水土保持通报,2014,34(6):94-100.
- [23] 李瑞平,史海滨,赤江刚夫,等.冻融期气温与土壤水盐运移特征研究[J].农业工程学报,2007,23(4):70-74.
- [24] 周智彬,李培军,徐新文,等.塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地对沙地盐分时空分布的影响[J].水土保持学报,2002,16(2):16-19.
- [25] 丁新原,周智彬,徐新文,等.咸水滴灌下塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地土壤水分三维时空动态[J].应用生态学报,2015,26(9):2600-2608.
- [26] 丁新原,周智彬,徐新文,等.咸水滴灌下塔克拉玛干沙漠腹地人工防护林土壤水盐动态[J].土壤学报,2016,53(1):103-116.
- [27] 苏培玺,赵爱芬,张立新,等.荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J].西北植物学报,2003,23(1):11-17.
- [28] 杨艳凤,周宏飞,徐利岗.古尔班通古特沙漠原生梭梭根区土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2011,22(7):1711-1716.
- [29] 格日乐,高润红.库布齐沙漠人工梭梭林地土壤储水量动态变化及其水分平衡分析[J].内蒙古农业大学学报,2010,31(3):125-129.