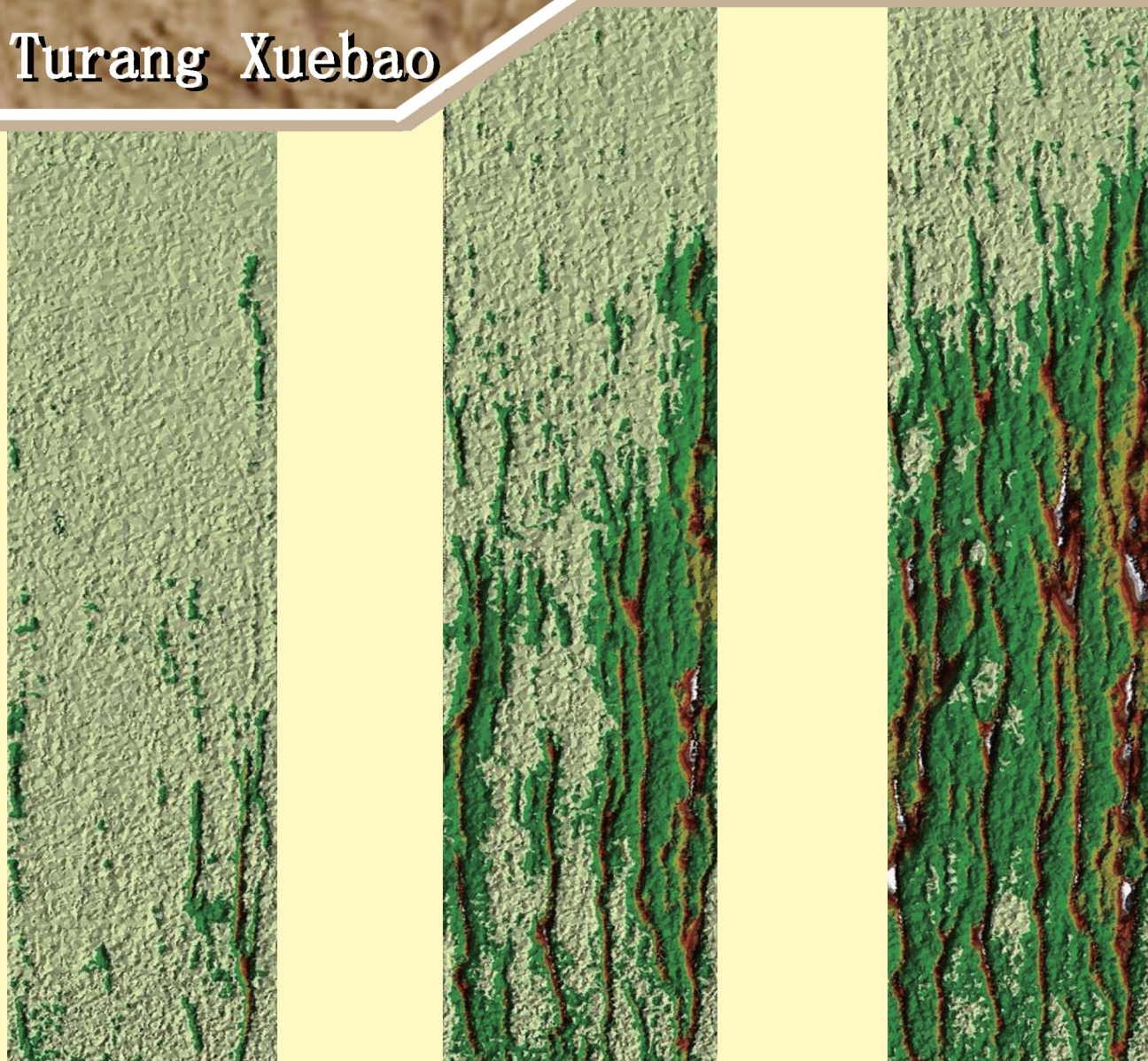


ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



土壤学报

第五十二卷

第一期

二〇一五年一月

科学出版社



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第1期

Vol.52 No.1

《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：汪枫生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊,1948年创刊)

第52卷 第1期 2015年1月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 1 Jan., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址：南京市北京东路71号 邮政编码：210008
电话：025-86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025-86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史学正
主 管 中国科学院
主 办 中国土壤学会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总 发 行 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717
电话：010-64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010-64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址：北京399信箱 邮政编码：100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

DOI:10. 11766/ trxb201401060009

科尔沁沙丘-草甸相间地区表土饱和导水率的土壤传递函数研究*

孙 丽^{1,2} 刘廷玺^{1†} 段利民¹ 贾 恪¹

(1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

(2 中国能源建设集团黑龙江省电力勘测设计研究院, 哈尔滨 150079)

摘 要 以科尔沁沙地典型坨-甸相间地区为研究区, 野外布设 240 个采样点, 对流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、沙丘区杨树林、沙丘区耕地、低覆盖度草甸、高覆盖度草甸、草甸区耕地、撂荒地 9 种地貌类型下的表层土壤进行了采样, 测定了其含水率、干容重、有机质、饱和导水率等理化特性, 分析了不同地貌类型下表层土壤理化参数差异。选取 Campbell、Cosby、Wosten 等、Saxton 等 4 种土壤饱和导水率传递函数, 对该地区表土饱和导水率进行了预测。结果显示这几种土壤传递函数预测值与实测值偏差较大, 相关系数均小于 0.3, 精度难以满足本地区应用。在此基础上, 选取土壤容重、有机质含量、饱和含水率、平均粒径、粒径标准偏差 5 种土壤特性参数作为输入变量, 采用主成分分析与非线性回归分析相结合的方法, 重新建立了预测本地区表土饱和导水率的土壤传递函数, 结果显示预测值与实测值相关系数为 0.661, 该传递函数可用于科尔沁沙地表层土壤饱和导水率的预测。

关键词 科尔沁沙地; 土壤传递函数; 表层土壤; 饱和导水率; 非线性回归

中图分类号 X833 **文献标识码** A

土壤是人类和动植物赖以生存和发展的基础, 是整个水文循环的重要组成部分, 是水分和化学物质进入地下水的过渡带^[1]。利用土壤粒径组成、容重、有机质含量等较易获取的基本土壤特性, 采用间接方法计算土壤饱和导水率或土壤水分特征曲线的方法, 称为土壤传递函数法 (Pedo-Transfer Functions), 简记 PTFs 法^[2]。近年来, 许多学者致力于通过间接方法获取土壤水力参数的研究^[3-6]。Campbell 和 Shiozawa^[7] 根据大量的英国地区土壤样本数据, 利用土壤容重和颗粒大小分布构建了土壤传递函数用于预测 Campbell 模型中土壤饱和导水率。同样, Rawls 和 Brakensiek^[8] 根据美国地区 5 320 个土壤样本数据, 基于线性回归方法仅用土壤粒度分布构建土壤传递函数用于预测 Brakensiek-Corey 模型中土壤饱和导水率。

本文以科尔沁沙地沙丘-草甸相间地区为研究对象, 通过对表层土壤物理、化学、水力特性参数的测试, 分析不同地貌类型区各参数的差异性与空间

分布规律, 同时, 利用饱和导水率、土壤粒度分布、容重及有机质等实验数据, 筛选并建立了适宜于该地区的饱和导水率的土壤传递函数。为沙漠化地区土壤水分和溶质运移机理研究提供基本参数, 同时为该地区生态环境建设、农牧业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

科尔沁沙地位于内蒙古东部、辽宁省北部和吉林省西北部地区, 地处我国北方半干旱农牧交错带的东端。研究区位于科尔沁沙地南缘, 隶属于内蒙古通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉镇, 地理坐标为 43°18'48" ~ 43°21'24"N, 122°33'00" ~ 122°41'00"E, 面积约 55 km²。地貌特点为流动、半流动、半固定与固定沙丘和草甸地相间分布, 属典型的半干旱荒漠化地区。地形趋势为南北高翘, 中间低平。该区多年平均气温约为

* 教育部博士点基金项目(20111515110003)、国家自然科学基金重点项目(51139002)和教育部创新团队发展计划(IRT13069)资助

† 通讯作者: 刘廷玺(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱半干旱地区生态水文研究。E-mail: txliu1966@163.com

作者简介: 孙 丽(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源系统模拟研究。E-mail: 24564632@qq.com

收稿日期: 2014-01-06; 收到修改稿日期: 2014-05-20

6.6℃,1月平均气温最低,为-13.3℃,7月平均气温最高,为23.8℃,年极端最低气温为-33.9℃,年极端最高气温36.2℃;多年平均降水量为389mm,其中,

6—8月降水量占年总降水量的69.3%;多年平均蒸发量为1412mm,蒸发主要集中在4—9月,此间蒸发量占全年蒸发量的79%左右。

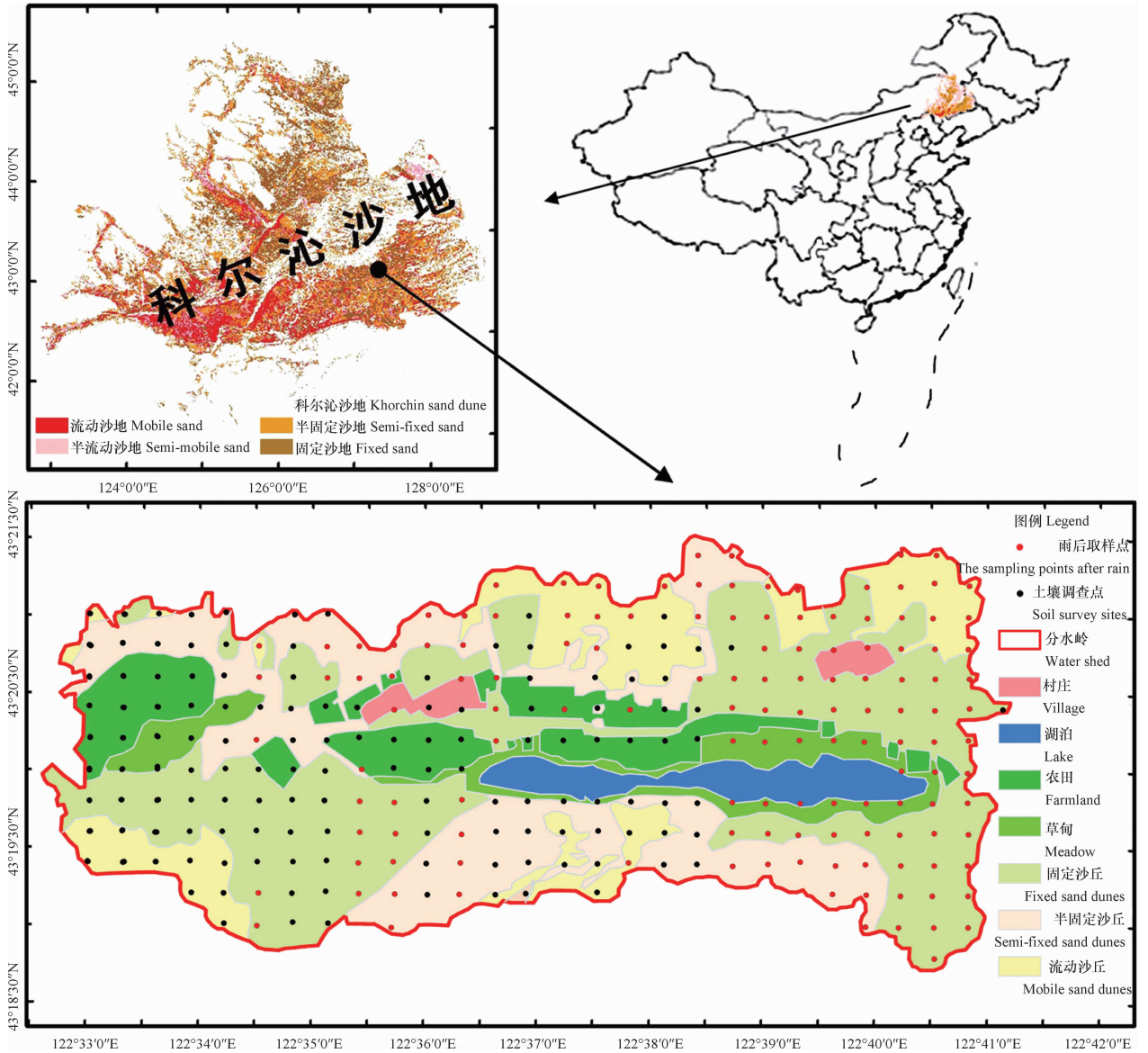


图1 研究区地理位置、地貌特征与试验点分布

Fig. 1 Location and landscape characteristics of the study area and distribution of sampling sites in the study area

1.2 野外调查与样品采集

2012年9—11月对研究区进行了系统的地面调查。首先,基于同期DEM数据,应用SWAT模型,模拟出研究区分水岭。然后,按照经度每隔18”、纬度每隔12”的原则划分栅格网,即划分400m×400m的方格线,相交点作为调查测试点。针对每个点,为保持土壤样品采集的一致性,均除去地表浮土后再取三个环刀,用于测定表土水力参数与干容重;并在环刀周围0~30cm范围内均匀取土样,用于在实验室测试粒度分布、物理与化学特性。同

时,利用GPS记录野外调查点的空间坐标,并对每个点及其周边的植被状况、地形地貌状况、土地利用状况进行记录。

1.3 土壤理化指标测定

土壤有机质采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法进行测定;土壤干容重采用环刀法测定;粒度分析利用德国新帕泰克公司的NANOPHOX™纳米激光粒度仪,选用干法进行试验,土壤颗粒粒径分级标准采用美国制:砂粒(2~0.05mm),粉粒(0.05~0.002mm),黏粒(<0.002mm);土壤饱和和导水率

利用定水头下的马氏瓶渗透仪进行测定;饱和含水率采用环刀底面缠纱布由底部浸水测定,待两次称重误差小于 2% 时,取平均值为其试验值。

1.4 研究方法

针对研究区土壤物理、化学指标及水力参数测试数据,首先利用 Excel 及 Spss17.0 进行基本统计分析,然后将研究区 240 个测试点表土的粒度分布、干容重、有机质等基本属性数据分别代入到 Campbell^[9]、Cosby 等^[10]、Wosten 等^[11-12]、Saxton 等^[13] 4 种饱和含水率土壤传递函数中,比较估算值与实测值的误差,评估 4 种传统土壤传递函数的预测精度。在此基础上,选取土壤容重、有机质含量、饱和含水率、平均粒径、粒径标准偏差 5 种土壤特性参数作为输入变量,采用逐步多元统计回归、主成分分析及非线性回归分析相结合的方法进行模拟分析,建立科尔沁沙地沙丘-草甸相间地区饱和和导水率的土壤传递函数方程。

利用平均误差 δ_{ME} ($m d^{-1}$)、均方根误差 δ_{RMSE} ($m d^{-1}$)、相关系数 r 作为检验指标,对本文引用的 4 种传统土壤传递函数和本文所建立土壤传递函数的结果进行精度分析。

$$\delta_{ME} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i) \quad (1)$$

$$\delta_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

$$r = \frac{\text{cov}(y, \hat{y})}{\sqrt{\text{var}(y) \text{var}(\hat{y})}} \quad (3)$$

式中, y_i 为饱和导水率实测值 ($m d^{-1}$); \hat{y}_i 为 PTFs 估算值 ($m d^{-1}$); N 为数据点个数; cov 为协方差函数; var 为方差函数。

δ_{ME} 反映了估算值对实测值的平均偏离程度,正值说明估算值整体上被低估,反之则说明高估了估算值。 δ_{RMSE} 反映了估算值与实测值的吻合程度, δ_{RMSE} 越大,说明估值效果越差。 r 反映了估算值与实测值在变化趋势上的相似性, r 越接近 1,说明估算值与实测值在变化趋势上越相似^[14-15]。

2 结果与讨论

2.1 植被状况与实验数据的基本统计

研究区流动沙丘植被覆盖度多小于 10%, 常见自生植物为沙蓬、差巴嘎蒿, 局部出现蒺藜草的流动沙丘开始向半流动半固定沙丘转变, 以中、细砂为主, 呈黄褐色; 半固定沙丘植被覆盖度一般大于

10%, 小于 50%, 常见自生植物为差巴嘎蒿, 其次为小叶锦鸡、蒿类等, 植物根系发育较浅, 以中、细砂为主, 呈黄褐色; 固定沙丘植被覆盖度大于 50%, 自生植物种类众多, 大量生长小叶锦鸡、白草等, 土壤以细、粉细砂为主, 植物根系大多分布在 0~20 cm 深度内; 草甸地植被以芦苇、苔草为主, 植物根系分布在 0~80 cm 深度内, 表层 0~40 cm 最多, 40~80 cm 深度内分布一些毛细根系, 土壤类型以壤土为主。

研究区属典型的沙丘-草甸相间地区, 地形起伏大, 地貌类型多样。根据各试验点附近地貌类型, 并结合其土地利用状况, 将 240 个采样点划分为流动沙丘、沙丘区杨树林、半固定沙丘、固定沙丘、沙丘区耕地、低覆盖度草甸、撂荒地、草甸区耕地、高覆盖度草甸 9 种类型。将 240 个试验点处所获实验数据, 按地貌类型进行分类和基本统计, 其结果如图 2。

图 2 中的地貌类型是以平均粒径由大到小排列的, 其中流动沙丘的平均粒径最大为 0.317 mm, 高覆盖草甸的平均粒径最小为 0.148 mm。

(1) 土壤表层含水率沙丘区小于草甸区。在沙丘区, 杨树林最大, 沙丘区耕地最低, 仅为 2.752%; 在草甸区, 高覆盖草甸含水率最大, 平均值超过 20%, 局部地区甚至可达 50%; 其次为低覆盖草甸、草甸区耕地, 草甸区撂荒地最低, 仅为 6.5%。这说明无论沙丘还是草甸开垦为农田后, 表层土壤保水能力下降、土壤裸露蒸发提高, 这一点在弃耕的撂荒地更加明显。

(2) 土壤饱和含水率和含水率的变化规律大体一致, 但沙丘区稍有差异。在沙丘区, 杨树林最大; 其次是沙丘区耕地、固定沙丘、流动沙丘, 半固定沙丘最低。这说明沙丘区林地的枯枝落叶和树木根系改善了土壤结构, 增加了沙土的有机质含量, 从而增加了土壤的饱和含水率。沙丘区表土的饱和含水率总体上随着平均粒径的减少而增大, 而流动沙丘大于半固定沙丘的原因, 我们认为是流动沙丘表层土壤极其疏松, 降低了土壤的干容重、增加了土壤的孔隙率所导致。

(3) 土壤干容重与饱和含水率的变化规律完全相反, 呈现出草甸区耕地大于高覆盖草甸的现象, 原因是草甸区被开垦耕作后破坏了表层土壤密集的根系层, 使土壤结构更密实。在沙丘区, 沙丘区耕地的干容重最大, 其原因是沙丘区耕地多分布在沙丘-草甸过渡带, 相比其他沙丘区, 土壤颗粒粗细搭配较均匀, 土壤更密实。

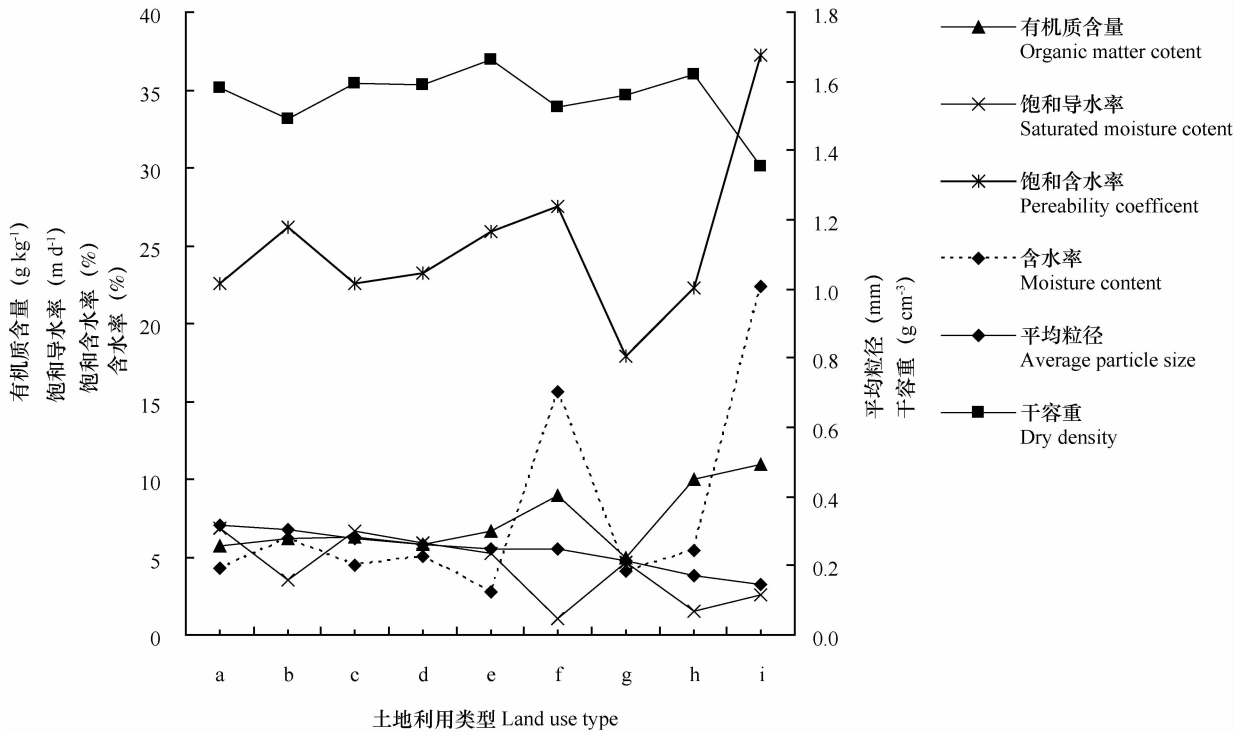


图 2 研究区表层土壤物理化学特性及其水力参数

Fig. 2 Soil physico-chemical properties and hydraulic parameters of the topsoil in the study area

注:a:流动沙丘 Mobile sand dunes;b:沙丘区杨树林 Poplar woods in sand dune area;c:半固定沙丘 Semi-fixed sand dunes;d:固定沙丘 Fixed sand dunes;e:沙丘区耕地 Cultivated land in sand dune area;f:低覆盖草甸 Low coverage meadow;g:撂荒地 Deserted land;h:草甸区耕地 Cultivated land in meadow area;i:高覆盖草甸 High coverage meadow

(4)有机质含量与植被覆盖度成正比关系。就草甸区而言,高覆盖草甸最大,撂荒地最低。这是由于草甸耕作后,土壤表层含水率降低,在风力作用下,土壤中的有机质、细颗粒物易于风蚀,有一定的沙化现象。就沙丘区而言,沙丘区耕地最大,流动沙丘最小。这是因为沙丘区耕地多分布在沙丘-草甸过渡区,土壤天然有机质含量高,加之当地牧民耕作使用农家肥,也会增加土壤有机质。流动沙丘有机质含量最低的原因是风沙使有机质和细颗粒物吹走,只留下较粗的有机质含量低的颗粒物。

(5)研究区表土的饱和导水率基本上是沙丘区大,草甸地小。在沙丘区,流动沙丘最大,沙丘区杨树林最低;在草甸区,撂荒地最大,低覆盖草甸地最低。这反映出土壤入渗特性受到土壤结构、土壤质地和土地利用方式等因素的影响^[16-21]。一般而言,由草甸到沙丘脊的深入,呈现出草甸-过渡带-沙丘区耕地-固定沙丘-半固定沙丘-流动沙丘的渐变

规律,地形由平缓-起伏-起伏较大,地面高程不断升高,饱和导水率逐渐增大。但也有特例,如沙丘区杨树林,多分布在沙丘-草甸过渡地带,有时也分布在固定沙丘、半固定半流动沙丘上,且随着树龄的不同,表层土壤的饱和导水率差异很大。在草甸区,撂荒地饱和导水率最大,其次为高覆盖草甸、草甸区耕地,低覆盖草甸最低。这说明草甸开垦未耕作或者耕作1至2年后弃耕,使土壤中原有的植被根系腐烂死亡,容易形成一些较大孔隙,同时耕作也使土壤松动,干容重降低,饱和导水率增加。而低覆盖草甸饱和导水率最低的原因,主要是低覆盖草甸区含盐量大,表土易于板结、坚硬,植物稀少根系不发育的缘故。

2.2 饱和导水率土壤传递函数的适用性

土壤饱和导水率与土壤物理、化学特性直接相关,本文选用 Campbell^[9]、Cosby 等^[10]、Wosten 等^[11-12]、Saxton 等^[13]4种传统土壤传递函数,计算研究区表层土壤的饱和导水率。如表1所示。

表 1 研究选用的土壤饱和导水率的传递函数

Table 1 Selected transfer functions of soil saturated hydraulic conductivity

土壤传递函数 Peto-transfer functions	PTFs 具体形式 PTFs specific form
Campbell ^[9]	$k_s = 6.851 \times (1.3/\rho)^{1.3b} e^{(-6.88 \times 10^{-2}c_1 - 3.63 \times 10^{-2}c_2 - 0.025)}$ $b = (e^{(-2.5 \times 10^{-2} - 3.63 \times 10^{-2}c_2 - 6.88 \times 10^{-2}c_1)})^{0.5} + 0.2 \times e^{(0.133c_2 + 0.477c_1 \ln^2(\exp(-2.5 \times 10^{-2} - 3.63 \times 10^{-2}c_2 - 6.88 \times 10^{-2}c_1)))^{0.5}}$
Cosby 等 ^[10]	$k_s = 1.148 \times 10^{(-0.6 + 1.26 \times 10^{-2}c_2 - 6.4 \times 10^{-3}c_1)}$
Wosten 等 ^[11-12]	砂土 sandy soil: $k_s = 1.13 \times 10^{-2} \times e^{(9.5 - 1.471\rho^2 - 6.88 \times 10^{-2}c_4 + 3.69 \times 10^{-4}c_4^2 - 0.33 \ln(c_1 + c_2))}$
	壤土 loam: $k_s = 1.13 \times 10^{-2} \times e^{(-45.4 + 64.8\rho - 22.21\rho^2 + 0.702c_4 - 1.562 \times 10^{-3}c_4^2 + 0.985 \ln(c_4) - 1.332 \times 10^{-3}c_1 \times c_4 - 0.47\rho \times c_4)}$
Saxton 等 ^[13]	$k_s = 0.148 \times e^{(12.012 - 7.55 \times 10^{-2} \times c_3 + (-3.895 + 3.67 \times 10^{-2}c_3)0.1103c_1 + 8.755 \times 10^{-4}c_1^2)/\theta_s}$

注: 方程中, k_s 为饱和导水率 (m d^{-1}), c_1 、 c_2 、 c_3 分别为土壤的黏粒、粉粒和砂粒的含量 (%), ρ 和 c_4 分别为土壤容重 (g cm^{-3}) 和土壤有机质含量 (g kg^{-1}), b 为与粒径有关的变量, θ_s 为土壤饱和含水量 (%) Note: In the equation, k_s is the saturated hydraulic conductivity (m d^{-1}), c_1 , c_2 , c_3 express respectively the content of soil clay, silt and sand (%), ρ and c_4 express respectively soil bulk density (g cm^{-3}) and soil organic matter content (%), b is a variable related to particle size, θ_s is the saturation water content of soil (%)

表 2 4 种土壤饱和导水率土壤传递函数的估值误差

Table 2 Estimation error of the four selected PTFs of saturated hydraulic conductivity

	Campell	Cosby	Wosten	Saxton	拟建 PTFs The proposed PTFs
δ_{ME} (m d^{-1})	0.101	-0.123	1.051	0.444	0.000
δ_{RMSE} (m d^{-1})	3.061	2.759	3.526	3.341	2.441
r	0.153	—	0.235	0.100	0.661

利用表 1 所列举的 4 种土壤饱和导水率的土壤传递函数, 通过对其系数调整, 对研究区 240 个点上的土壤饱和导水率进行了估算。表 2 为应用 4 种土壤饱和导水率土壤传递函数计算所得的估算值与实测值的 δ_{ME} 、 δ_{RMSE} 和相关系数 r 。可以发现, 就 δ_{ME} 值而言, Cosby 函数估算值总体上低于实测值, 而 Campell、Wosten 和 Saxton 函数估算值总体上大于实测值; 从 δ_{RMSE} 值来看, Campell 和 Cosby 函数精度高于 Wosten 和 Saxton 函数。从估算值与实测值的相关系数 r 来看, Wosten 函数的 r 值最大, 则说明该 PTFs 最能反映研究区饱和导水率实测值的变化趋势。由于 Cosby 模型只考虑土壤的黏粒和砂粒含量, 不免具有一定的局限性; Saxton 函数尽管考虑了不同粒径的含量和饱和含水率, 但同样具有局限性, 预测效果较差。Campell 函数考虑了不同粒径含量和干容重, 但对壤土尤其是有机质含量较高的壤

土其估算效果较差。Wosten 函数考虑了不同粒径含量、干容重与有机质含量, 尽管考虑的因素较多, 但由于模型中尚未考虑不含有黏粒和粉粒的土壤类型, 因此, 尽管估算值与实测值的趋势一致, 但数据散乱。笔者在应用该模型进行估值时, 通过校正比较, 如遇不含砂粒和黏粒的情况, 则一律假定其和为 0.1, 这时的预测效果尽管离散性也较大, 但比起其他模型其相关程度有所提高^[22]。

从图 3 可以看出 Campell、Saxton、Cosby、Wosten 4 种模型结果相对于 1:1 线偏离的程度很大, 预测效果均不理想, 尤其是 4 种模型用于估算草甸区的饱和导水率时误差更大。这是由于草甸区地表植被覆盖度高, 植物根系发育程度复杂多变, 对饱和导水率的影响很大, 此外, 还有生物洞穴、粗大腐烂根系、有机质含量、人类耕作频度和类型等众多不确定因素。

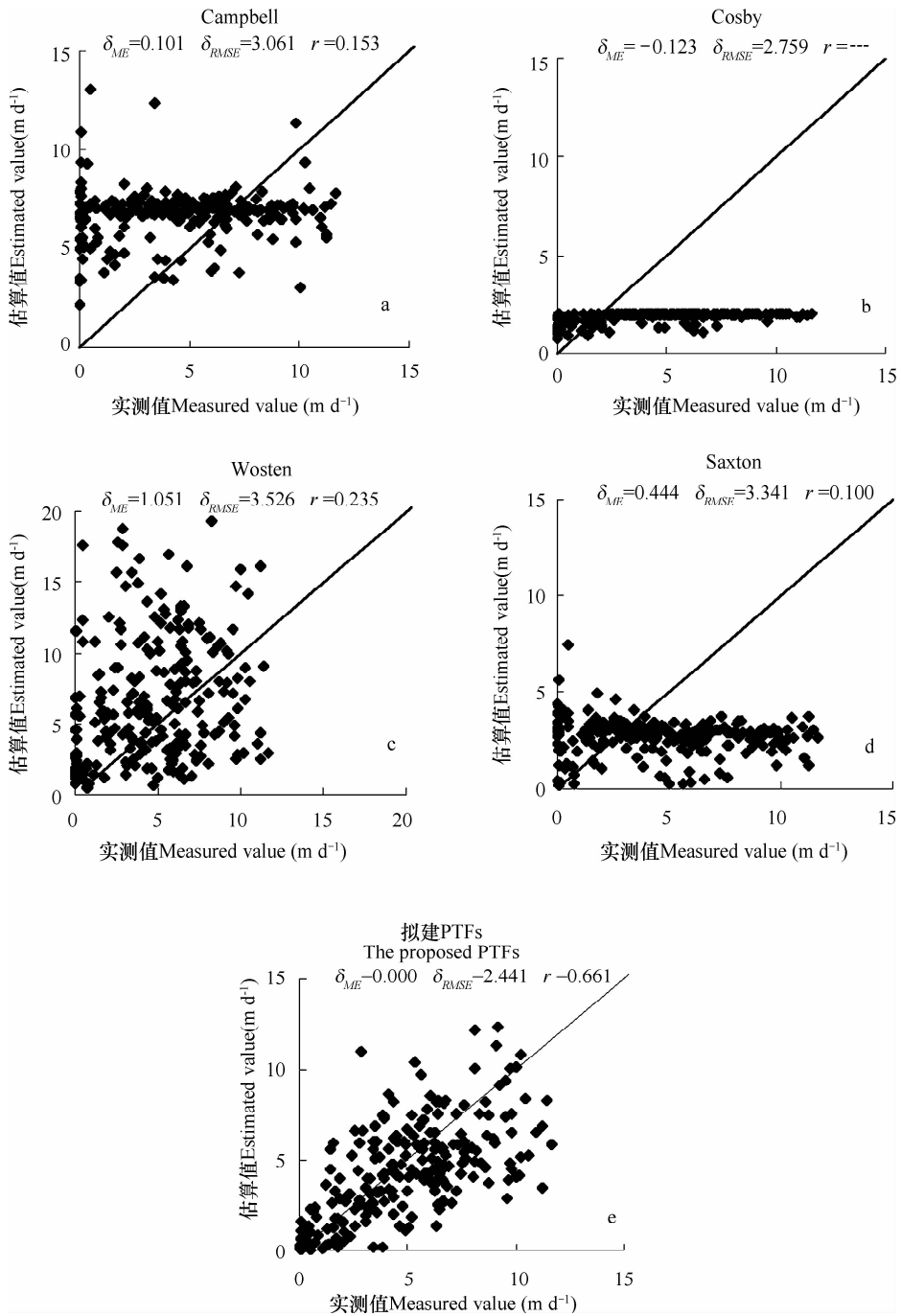


图 3 饱和导水率土壤传递函数的估算值与实测值对比

Fig. 3 Comparison between measured and PTFs-estimated values of soil saturated hydraulic conductivity

2.3 饱和导水率的 PTFs 模拟

由于土壤的水力特性参数与其物理化学特征参数之间不是简单的线性关系^[23],本文采用主成分分析及非线性回归分析相结合的方法进行模拟分析,建立研究区饱和导水率的估值预测方程。主要步骤:

(1)首先建立多元统计回归模型, $\ln(k_s) = ap + bc_4 + c\theta_s + dd_g + f\sigma_g$ (a、b、c、d、f 为各自变量的回归

系数)。

(2)计算模型的协方差阵,相关系数阵,然后采用主成分分析方法,即根据协方差阵排列特征根、贡献率及累计贡献率,选定累计贡献率大于 85% 的变量为主因子,否则为惰性因子。

(3)对各主因子进行非线性分析并按贡献率大小逐步引入到原模型,即对单一主因子进行非线性变换,找到单一主因子和因变量之间的最优拟合,

然后将此最优拟合带入原模型逐步优化回归并进行统计回归分析。

(4)对改进的模型进行相关系数 R 检验、 t 检验。若 t 所对应的 p 值小于 $p_{0.05}$, 则该变量与因变量有显著的统计学意义。如果惰性因子与上次模型中确定的惰性因子是同一因子, 则从模型中剔除该惰性因子; 否则重新确定改进模型的主因子和惰性因子。

(5)重复步骤(2)~步骤(4), 直至模型中的各因子与因变量均达到统计意义上的显著相关。

通过以上步骤, 所建 PTFs 方程如下:

$$k_s = e^{(-3.242 - 3.38 \times 10^{-2}c_4 - 53.972d_g + 63.155d_g^{0.5} + 98.000\sigma_g - 71.882\sigma_g^{0.5})} \quad (4)$$

式中, c_4 为土壤有机质含量 ($g \text{ kg}^{-1}$); d_g 为平均粒径 (mm); σ_g 为标准偏差。

土壤粒径采用平均粒径 d_g (式(5)) 和标准偏差 σ_g (式(6)) 表示^[24]。

$$d_g = \frac{\sum_1^i (d_i \times f_i)}{100} \quad (5)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{\sum_1^i f_i (d_g - d_i)^2}{100}} \quad (6)$$

式中, d_i 为粒径区间中值; f_i 为粒径区间的粒径百分含量。

本文利用非线性逐步回归方法建立的饱和导水率 PTFs 函数, 经检验, 其 δ_{ME} 值为 0.000 m d^{-1} , 估算值与实测值相当; δ_{RMSE} 值为 2.441 m d^{-1} , 较目前各 PTFs 函数已有明显的降低, 相关系数 r 为 0.661 , 相关性较好。从图 3 也可以看出 PTFs 模拟结果分布于 1:1 线两侧, 从而非线性回归方程(4) 可以作为该区表层土壤饱和导水率的土壤传递函数使用。

3 结 论

从科尔沁沙地典型沙丘-草甸相间地区不同类型区表层土壤物理化学及水力特性来分析, 沙丘区种植杨树后, 表土饱和含水率与含水率增加、干容重减少、有机质含量微增但不显著、饱和导水率减少; 草甸地垦殖撂荒后, 表土饱和含水率与含水率减少、干容重增加、有机质含量减少、饱和导水率增加, 这说明撂荒地导致土地贫瘠沙化、土地持水性下降、土颗粒更加密实, 需要引起重视。采用 Campbell、Cosby、Wosten 等、Saxton 等所建饱和导水

率的土壤传递函数估算精度都不高, 结果不理想, 说明目前已有各类模型不适用于本地区饱和导水率的估算。利用非线性逐步回归方法所建立的研究区表层土壤饱和导水率的土壤传递函数为 $k_s = e^{(-3.242 - 3.38 \times 10^{-2}c_4 - 53.972d_g + 63.155d_g^{0.5} + 98.000\sigma_g - 71.882\sigma_g^{0.5})}$, 经检验, 所建 PTFs 函数精度较高, 估算饱和导水率与实测值较接近, 该方程可以作为该区表层土壤饱和导水率的土壤传递函数使用。

参 考 文 献

- [1] 刘继红. 基于不同土壤转换函数构建方法的封丘县土壤水力特性研究. 郑州: 郑州大学水利与环境学院, 2012. Liu J H. Research on hydraulic characteristics of the soil based on the different construction methods of pedo-transfer function in Fengqiu (In Chinese). Zhengzhou: College of Water Resources and Environment Zhengzhou University, 2012
- [2] Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, 1989, 9:177—233
- [3] 黄元仿, 李韵珠. 土壤水力性质的估算土壤转换函数. 土壤学报, 2002, 39(4):517—523. Huang Y F, Li Y Z. Estimation of soil hydraulic properties pedo-transfer functions (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4):517—523
- [4] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 892—898
- [5] 朱安宁, 张佳宝, 陈效民, 等. 封丘地区土壤传递函数研究. 土壤学报, 2003, 40(1):53—58. Zhu A N, Zhang J B, Chen X M, et al. Study on pedo-transfer function in Fengqiu (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1):53—58
- [6] 刘建立, 徐绍辉, 刘慧. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展. 水利学报, 2004, 35(2):68—76. Liu J L, Xu S H, Liu H. A review of development in estimating soil water retention characteristics from soil data (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(2):68—76
- [7] Campbell G S, Shiozawa S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle size distribution and bulk density data. Riverside, California: University of California, 1992:317—328
- [8] Rawls W J, Brakensiek D L. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. New York: American Society of Civil Engineers, 1985:293—299
- [9] Campbell G S. *Soil physics with basic: Transport models for soil-plant system*. Amsterdam: Elsevier, 1985
- [10] Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 1984, 20:682—690
- [11] Wosten J H M. Pedo-transfer functions to evaluate soil quality// Gregorich E G, Carter M R. *Soil quality for crop production and ecosystem health*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1997: 221—245

- [12] Wosten J H M, Lilly A, Nemes A, et al. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 1999, 90:169—185
- [13] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50:1031—1036
- [14] 廖凯华, 徐绍辉, 吴吉春, 等. 不同土壤转换函数预测砂土非饱和导水率的对比分析. *水科学进展*, 2013, 24(4): 560—567. Liao K H, Xu S H, Wu J C, et al. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of sandy soils using different pedo-transfer functions (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 560—567
- [15] 李小鹏, 张佳宝, 吉丽青, 等. 土壤传递函数在计算土壤饱和导水率中的应用. *灌溉排水学报*, 2009, 28(2): 70—73. Li X P, Zhang J B, Ji L Q, et al. Application of pedo-transfer functions in calculating saturated soil hydraulic conductivity of Fengqi County (In Chinese). *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(2): 70—73
- [16] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响. *农业工程学报*, 2008, 24(6): 14—20. Zhao Y G, Zhao S W, Cao L H, et al. Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi arid typical grassland areas (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(6): 14—20
- [17] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究. *水科学进展*, 2006, 17(5): 604—609. Wang H F, Shao M A. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2006, 17(5): 604—609
- [18] Machiwal D, Jham K, Mal B C. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(4): 569—582
- [19] 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓, 等. 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究. *水科学进展*, 2006, 17(4): 471—476. Jia H W, Kang S Z, Zhang F C, et al. Spatial variability of soil water infiltration in the plain of Shiyang River basin (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2006, 17(4): 471—476
- [20] 姜娜, 邵明安, 雷廷武. 水蚀风蚀交错带坡面土壤入渗特性的空间变异及其分形特征. *土壤学报*, 2005, 42(6): 904—908. Jiang N, Shao M A, Lei T W. Fractal dimension and spatial variability of soil water infiltration properties on nature slope in a water-wind erosion interlaced region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 904—908
- [21] 颜永强, 段文标, 王晶. 莲花湖库区水源涵养林土壤入渗性能的空间分布特征. *中国水土保持科学*, 2008, 6(3): 88—93. Yan Y Q, Duan W B, Wang J. Spatial distribution characteristics of soil infiltration capacity in water conservation forest in Lianhua Lake reservoir area (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(3): 88—93
- [22] 门明新, 彭正萍, 许峰, 等. 河北省土壤容重的传递函数研究. *土壤通报*, 2008, 39(1): 33—37. Men M X, Peng Z P, Xu H, et al. Investigation on pedo-transfer function for estimating soil bulk density in Hebei Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 33—37
- [23] 王志强. 科尔沁沙地土壤水力特性的推算. 呼和浩特: 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 2003. Wang Z Q. Estimation of hydraulic characteristic properties of the Horqin sandy land (In Chinese). Hohhot: Water Conservancy and Civil Engineering Institute, Inner Mongolia Agricultural University, 2003
- [24] 黄思静. 用 EXCEL 计算沉积物粒度分布参数. *成都理工大学学报*, 1999, 4(2): 196—198. Huang S J. Calculation of grain size distribution parameters of sediments by microsoft excel (In Chinese). *Journal of Chengdu University of Technology*, 1999, 4(2): 196—198

PREDICTION OF SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SURFACE SOIL IN SAND-DUNE-AND-MEADOW INTERLACED REGION OF HORQIN WITH PEDO-TRANSFER FUNCTIONS METHOD

Sun Li^{1,2} Liu Tingxi^{1†} Duan Limin¹ Jia Ke¹

(1 College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

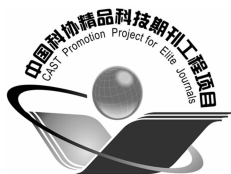
(2 Chinese Energy Construction Group Co. Ltd Heilongjiang Research Institute of Electric Power Exploration and Design, Haerbin 150079, China)

Abstract In a sand-dune-and-meadow interlaced region typical of Horqin, a total of 240 sampling sites were laid out, covering 9 different types of landforms, i. e. , mobile sand dunes, semi-fixed sand dunes, fixed sand dunes, poplar woods in sand dune area, cultivated land in sand dune area, low coverage meadow, high coverage meadow, cultivated land in meadow area, and deserted land, for collection topsoil samples. Physicochemical properties, including the moisture content, dry bulk density, organic matter, and saturated hydraulic conductivity, of the soil samples were determined for analysis of variation of the properties with geomorphic type. These four kinds of pedo-transfer functions, that is Campbell, Cosby, Wosten et al, and Saxton et al, were chosen for use to predict saturated hydraulic conductivity of the surface

soils in this region. Results show that the predicted values and the measured values differed quite sharply, with correlation coefficient being less than 0.3, so the precision of the prediction was far from satisfactory for use in this region. On such a basis, soil bulk density, organic matter content, saturated moisture content, average particle size, and particle size standard deviation were used as input variables in combination with principal component analysis and nonlinear regression analysis methods. In this way, new pedo-transfer functions were established for prediction of saturated hydraulic conductivity of the surface soil in this region. Results show that the correlation coefficient between predicted and measured values was increased up to 0.661, demonstrating that the new pedo-transfer functions can be applied to prediction of saturated hydraulic conductivity of the surface soil of Horqin sandy land.

Key words Horqin sandy land; Pedo-transfer function; Surface soil; Saturated hydraulic conductivity; Nonlinear regression

(责任编辑:汪枫生)



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 1 期 2015 年 1 月

目 次

综述与评论

农业土壤学研究:侯光炯学术思想形成之考察——纪念侯光炯先生诞辰 110 周年..... 申丽娟 丁恩俊 陈绍兰等(1)

土壤多样性研究趋势与未来挑战 任圆圆 张学雷(9)

土壤磷酸盐氧同位素分析方法和应用研究进展 张 晗 王佳妮 郭庆军等(19)

研究论文

土壤制图中多等级代表性采样与分层随机采样的对比研究 杨 琳 朱阿兴 张淑杰等(28)

河南省典型淋溶土土系划分研究 鞠 兵 吴克宁 李 玲等(38)

黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟 吴淑芳 刘政鸿 霍云云等(48)

黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征 高晓东 吴普特 张宝庆等(57)

科尔沁沙丘-草甸相间地区表土饱和和导水率的土壤传递函数研究 孙 丽 刘廷玺 段利民等(68)

砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响 张 磊 齐瑞鹏 张应龙等(77)

稳定同位素 ²⁰²Hg 稀释技术测定土壤汞有效性——与化学提取方法比较..... 郑顺安 徐志宇 王 飞等(87)

土壤提取液中酰基高丝氨酸内酯的气相色谱-质谱检测方法优化 生弘杰 宋 洋 卞永荣等(95)

复合污染土壤中土霉素的吸附行为及其对土壤重金属解吸影响的研究 陈励科 马婷婷 潘 霞等(104)

污染区千金子和酢浆草根际土壤中 PAHs 结合态残留的梯度分布 王意泽 高彦征 彭安萍等(112)

土壤磷解吸特性对菜稻轮作田间渗漏水总磷浓度的影响 章明清 李 娟 孔庆波(120)

湖区小麦-玉米轮作模式下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究 谭德水 江丽华 谭淑樱等(128)

鄱阳湖洲滩湿地土壤-水-植物系统中磷的静态迁移研究 徐 进 徐力刚 丁克强等(138)

菇菜套作对土壤微生物群落的影响 陈 敏 王军涛 冯有智等(145)

黄土高原油松根际土壤酶活性及真菌群落多样性研究——以黄龙山林场为例 褚洪龙 李 莎 唐 明(154)

硅介导番茄青枯病抗性的土壤定量蛋白质组学研究 陈玉婷 林威鹏 范雪滢等(162)

有机无机肥配施对红壤旱地花生生理特性、产量及品质的影响 许小伟 樊剑波 陈 晏等(174)

氮素富集对青藏高原高寒草甸土壤有机碳迁移和累积过程的影响 李林森 程淑兰 方华军等(183)

长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究 何翠翠 王立刚 王迎春等(194)

火烧和保留采伐剩余物对土壤有机碳矿化的影响 吴君君 杨智杰 刘小飞等(203)

研究简报

碳氮稳定同位素检测能力的验证——2013 年实验室间比对分析结果的汇总 曹亚澄 韩 勇 唐昊冶等(212)

土壤厚度的划分标准与案例研究 易 晨 李德成 张甘霖等(220)

积盐条件下土壤酸化过程的特异性研究 王媛华 段增强 赵 宇等(228)

四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究 张 智 王伟妮 李 昆等(234)

小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响 李宗超 胡 霞(242)

信息

《土壤学报》2013 年度优秀论文评选揭晓 (241)

封面图片:黄土坡面细沟形态发育过程(由吴淑芳提供)

CONTENTS

Reviews and Comments

Agricultural soil science research: Formation of Hou Kuangchun's academic thought—Celebrate 110th anniversary of Mr Hou Kuangchun's birth Shen Lijuan, Ding Enjun, Chen Shaolan, et al. (8)

Study on pedodiversity: Status quo and future challenges Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei (17)

Advance in study on method for oxygen isotopic analysis of phosphate in soil and its application Zhang Han, Wang Jiani, Guo Qingjun, et al. (26)

Research Articles

A comparative study of multi-grade representative sampling and stratified random sampling for soil mapping Yang Lin, Zhu A-xing, Zhang Shujie, et al. (37)

Classification of Typical Argosols of Henan Province at soil series level of Chinese Soil Taxonomy Ju Bing, Wu Kening, Li Ling, et al. (47)

Development of rill erosion on loess slope and its simulation Wu Shufang, Liu Zhenghong, Huo Yunyun, et al. (55)

Spatial variability of available soil moisture and its seasonality in a small watershed in the hilly region of the Loess Plateau Gao Xiaodong, Wu Pute, Zhang Baoqing, et al. (66)

Prediction of saturated hydraulic conductivity of surface soil in sand-dune-and-meadow interlaced region of Horqin with pedo-transfer functions method Sun Li, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. (75)

Effects of amendment of aeolian sandy soil and loess with soft sandstone on soil water retention curve and evaporation Zhang Lei, Qi Ruipeng, Zhang Yinglong, et al. (85)

Comparison between stale isotope ²⁰²Hg dilution technique and chemical extraction in determining Hg availability in two typical soils of China Zheng Shunan, Xu Zhiyu, Wang Fei, et al. (94)

Optimization of determination of N-acyl-homoserine lactones in soil solution with Gas-Chromatography-Mass Spectrometry Sheng Hongjie, Song Yang, Bian Yongrong, et al. (102)

Sorption behavior of oxytetracycline in complex contaminated soil and its effects on desorption of heavy metals in the soil Chen Like, Ma Tingting, Pan Xia, et al. (111)

Gradient distribution of bound-PAH residues in different layers of rhizosphere soils of moleplant and wood sorrel growing in polluted regions Wang Yize, Gao Yanzheng, Peng Anping, et al. (118)

Soil P desorption characteristics and their effects on total P concentration in percolating water in fields under vegetable-rice rotation system Zhang Mingqing, Li Juan, Kong Qingbo (127)

Effects of fertilization controlling nitrogen and phosphorus loss from farmland under wheat-maize rotation in Nansi Lake region Tan Deshui, Jiang Lihua, Tan Shuying, et al. (137)

Static transfer of phosphorus in the soil-water-plant system of beach wetlands in Poyang Lake Xu Jin, Xu Ligang, Ding Keqiang, et al. (144)

Changes in soil microbial community in response to tomato-*Agaricus bisporus* interplanting Chen Min, Wang Juntao, Feng Youzhi, et al. (152)

Soil enzyme activity and fungal community diversity in rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* Carr. growing on Loess Plateau— A case study of Huanglongshan forest farm Chu Honglong, Li Sha, Tang Ming (161)

Soil quantitative proteomic analysis of silicon-mediated resistance of tomato (*Solanum lycopersicum*) to *Ralstonia solanacearum* Chen Yuting, Lin Weipeng, Fan Xueying, et al. (172)

Effect of manure combined with chemical fertilizer application on yield, kernel quality and physiological characteristics of peanut to red soil in subtropical China Xu Xiaowei, Fan Jianbo, Chen Yan, et al. (181)

Effects of nitrogen enrichment on transfer and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau Li Linsen, Cheng Shulan, Fang Huajun, et al. (192)

Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil He Cuicui, Wang Ligang, Wang Yingchun, et al. (202)

Effect of prescribed burning and reservation of logging residues on soil organic carbon mineralization Wu Junjun, Yang Zhijie, Liu Xiaofei, et al. (210)

Research Notes

Testing of proficiency for measurement of carbon and nitrogen stable isotopes Cao Yacheng, Han Yong, Tang Haoye, et al. (218)

Criteria for partition of soil thickness and case studies Yi Chen, Li Decheng, Zhang Ganlin, et al. (227)

Specificity of soil acidification affected by salt accumulation Wang Aihua, Duan Zengqiang, Zhao Yu, et al. (233)

Effects of nitrogen fertilization on rice in different regions of Sichuan Province Zhang Zhi, Wang Weini, Li Kun, et al. (240)

Effects of shrub (*Caragana microphylla* Lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland Li Zongchao, Hu Xia (248)

Cover Picture: Rill morphological development process on loess slope (by Wu Shufang)