

鄱阳湖滨不同植被类型沙地土壤有效持水能力研究

李凤英¹, 张露², 何小武¹, 罗秋月³

(1. 江西农业大学 国土资源与环境学院, 南昌 330045;

2. 江西农业大学 林学院, 南昌 330045; 3. 天能电池集团有限公司, 浙江 湖州 313100)

摘 要: 鄱阳湖滨沙地是我国南方典型的沙地。研究采用经过筛选的土壤转换函数(PTFs)比较分析了鄱阳湖滨沙地 4 种主要植被类型(刺槐、湿地松、蔓荆子和自然荒草地植被)土壤的有效持水量,旨在为南方湖滨沙地生态植被恢复提供土壤水分评价方法参考,也为更好地评价不同植被类型的沙地生态恢复模式效应提供依据。结果表明:通过统计检验,Rawls 模型的 ME 和 RMSE 值分别为 0.005 8, 0.001 0, 显示其较 Saxton 模型、Batjes 模型、Minasny 模型具有更好的预测准确度,更适合于鄱阳湖滨沙地土壤水分特征估算分析;经过测定表明,不同植被类型土壤田间持水量依次为湿地松>蔓荆子>刺槐>荒草地;Rawls 模型计算结果表明:不同植被类型土壤凋萎系数依次为刺槐>湿地松>蔓荆子>荒草地,不同植被类型土壤有效持水量依次为湿地松>蔓荆子>刺槐>荒草地。

关键词: 沙地土壤; 土壤有效持水量; 土壤转换函数; 鄱阳湖滨

中图分类号: S714.7; S152.7⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)02-0107-05

Available Water Holding Capacity of Sandy Soil in the Shore of Poyang Lake

LI Fengying¹, ZHANG Lu², HE Xiaowu¹, LUO Qiuyue³

(1. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Tianneng Battery Group Co., Ltd., Huzhou 313100, China)

Abstract: Sandy soil of Poyang Lake is located in the south of China. Available water holding capacity of the sandy soil in four different plantation types was analyzed with method of pedotransfer functions. The results showed that ME and RMSE of Rawls model were 0.005 8 and 0.001 0, respectively, suggesting that Rawls model exhibited the higher projection accuracy, and was much fitter for estimating available soil water holding capacity of sandy soil in Poyang Lake region than Saxton model, Batjes model and Minasny model; the soil field capacity under different types of vegetation decreased in the order: *Pinus elliotii* > *Fructus viticis* > *Robinia pseudoacacia* > natural grass; according to the values estimated by Rawls model, the permanent wilting point of soil under different types of vegetation decreased in the sequence: *Robinia pseudoacacia* > *Pinus elliotii* > *Fructus viticis* > natural grass, the available water holding capacity of soil decreased in the order: *Pinus elliotii* > *Fructus viticis* > *Robinia pseudoacacia* > natural grass.

Keywords: sandy soil; available soil water holding capacity; pedotransfer functions; shore of Poyang Lake

我国是世界上土地沙化最为严重的国家之一。据国家林业局第五次监测结果^[1], 全国沙化土地面积约 172.12 万 km², 占国土面积的 17.93%, 其中新疆、青海、西藏、内蒙古和甘肃省五省沙化土地面积占全国的 93.95%。目前江西全省沙地面积约 7.25 万 hm², 其中鄱阳湖滨沙地约占全省沙化面积的 40.3%。土地的沙化严重影响人民的生存与生活质量, 也影响国家经济的持续发展。我国人民为此开展了沙地生态恢复治理等工作, 并取得了卓越成效。在

2009—2014 年, 沙地面积年均减少 19.8 万 hm²^[1]。水是植被生长的主要生态因子之一, 土壤持水能力一直是生态植被恢复研究中的重要课题, 得到国内外广大学者的高度关注和研究, 也获得了丰硕成果^[2-13]。在计算土壤持水能力时, 研究者通过试验实测获得土壤持水能力所需相关参数^[2-7], 也有通过土壤转换函数(Pedo-transfer Functions, PTFs)间接估算获得^[8-13]。其中由于 PTFs 方法简单, 已经被越来越多的中外专家学者所应用。

鄱阳湖滨沙地是我国南方较为典型的沙地,属于亚热带湿润季风气候区,不同于西北干旱、半干旱地区的气候特征,其治理方式有明显差别。鄱阳湖滨沙地治理的工作开展较早,主要以生态恢复为主,也取得了较好成效。其相关研究主要集中在沙地土壤养分、植物多样性、治理效果等方面^[14-19],对土壤含水量动态变化规律的研究则相对较少^[19],对沙地土壤持水能力则了解甚少。本研究以鄱阳湖滨沙地土壤为研究对象,应用 PTFs 方法,研究生态植被恢复后不同植被类型的沙地土壤有效持水量,一方面筛选出适合鄱阳湖滨沙地土壤的 PTFs 模型,另一方面比较不同植被恢复类型对沙地土壤有效持水能力的影响,为该区的沙地治理提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于江西省北部、鄱阳湖滨的庐山市,属中亚热带季风区,雨量充沛,日照充足,年均温度 18℃,年降水量 1 437.1 mm,集中在 3—8 月。庐山市沙化土地主要分布在鄱阳湖滨岸带,全市现有沙化土地 2 213.3 hm²,其中固定沙地占 77.84%,多为人工固定沙地。试验地点位于该市的星子镇,地理坐标 29°20'N, 116°00'E,属于该市沙化土地造林区,为沟谷流水作用下形成的次生堆积沙地^[20]。

1.2 试验设计及取样测定

本研究设计的总体思路是选取 2001 年种植的湿地松(*Pinus elliotii*)、刺槐(*Robinia pseudacacia*)和蔓荆子(*Fructus viticis*)3 种植被类型和自然恢复的荒草地 4 个典型区域设置观察样地,首先测定土壤田间持水量,与选定的 4 种 TPFs 模型的估算结果进行比较验证,从中筛选适合研究区的 TPFs 模型;然后利用筛选出的 TPFs 模型估算土壤凋萎系数,并结合测定的田间持水量计算土壤有效持水量;最后根据有效持水量计算结果进行比较分析。具体的取样测定方法如下。

选择 4 种植被类型的样地各 3 块,在每块样地内布设 3 个 20 m×20 m 的样方,在每个样方中按对角线挖掘 3 个 1 m×1 m×1 m 的土壤剖面,按土层深度 20 cm 的间隔分为 5 个层次,各层按四分法取一个混合样,带回实验室。同时,在各个土壤剖面分层用环刀取样,采用环刀法测定土壤容重和田间持水量^[3]。

土壤样品带回实验室自然风干后,一部分过 0.25 mm 筛,采用重铬酸钾氧化还原滴定—外加热法测定土壤有机质;另一部分用干筛法做土壤机械组成分析。

1.3 数据处理

数据按照 0—20 cm(表层),20—40 cm(中上层)和 40—100 cm(下层)进行统计分析,其中 40—100

cm 的数值按土壤剖面下面 3 个层次的平均值算。

用 SPSS 22.0 对数据进行单因素方差分析,用最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的均值,应用 Excel 2003 进行绘图。

1.4 土壤转换函数模型

本研究选择 4 个 PTFs 模型预测土壤 0—100 cm 的田间持水量,与实际测定值进行比较,从中筛选适合鄱阳湖滨沙地土壤的估算模型,然后应用筛选出的模型估算 0—100 cm 土层凋萎系数,并据此计算土壤有效持水量。

(1) Rawls 等^[21]利用美国 32 个州 2 541 个土层数据多元线性回归得出的方程(Rawls 模型):

$$\theta_f = 0.2576 - 0.0020P_s + 0.0036P_c + 0.0299P_{om} \quad (1)$$

$$\theta_w = 0.0260 + 0.0050P_c + 0.0158P_{om} \quad (2)$$

式中: θ_f 为土壤田间持水量; P_s 为土壤沙粒含量; P_c 为土壤黏粒含量; P_{om} 为土壤有机质含量; θ_w 为土壤凋萎系数。

(2) Saxton 等^[22]在 Rawls 模型基础上去掉有机质参数后改进的方程(Saxton 模型):

$$\theta = \left(\frac{\varphi}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (3)$$

$$A = 100 \exp(-4.396 - 0.0715P_c - 0.000488P_s - 0.00004285P_s^2P_c) \quad (4)$$

$$B = -3.14 - 0.00222P_c^2 - 0.00003484P_s^2P_c \quad (5)$$

式中: θ 为土壤含水量; φ 为土壤水势。其中,当 $\varphi = 33$ kPa 和 $\varphi = 1\,500$ kPa 时计算得出的土壤含水量分别代表土壤田间持水量 θ_f 和凋萎系数 θ_w 。

(3) Batjes^[8]利用全世界范围大约 3 000 个土壤剖面 15 000 多个土层数据回归得出的方程(Batjes 模型):

$$\theta_f = 0.4600P_c + 0.3045P_s + 2.0703P_{om} \quad (6)$$

$$\theta_w = 0.3624P_c + 0.1170P_s + 1.6054P_{om} \quad (7)$$

(4) Minasny 和 Hartemink^[23]提出的适合热带地区估算的简易模型(Minasny 模型):

$$\theta_f = 56.5 - 7.49D - 0.34P_s \quad (8)$$

$$\theta_w = 7.95 + 0.4P_c + 0.86P_{om} - 0.004(P_c - 37.7)^2 \quad (9)$$

式中: D 为土壤容重。

1.5 模型验证方法

统计分析通常用于模型的验证。本研究采用平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)检验 PTFs 模型在鄱阳湖沙地的适用性^[9,24]。

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - E_i)}{N} \quad (10)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N(M_i-E_i)^2}{N}}$$

(11)

式中： M_i 为第 i 个田间持水量观测值； E_i 为第 i 个田间持水量估算值； N 为观测值个数。

2 结果与分析

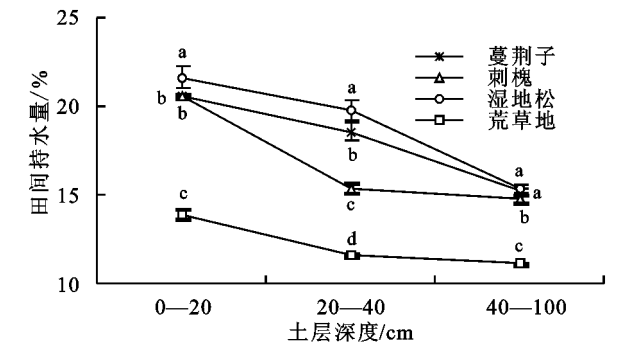
2.1 土壤田间持水量估算检验

采用 4 个 TPFs 模型进行模拟后与观测值比较的结果见表 1。通过采样观测到的不同植被类型 0—100 cm 土层的田间持水量平均为 16.51%，变异系数为 0.211 7，属于中等程度变异，而 4 个模型估算值的变异程度均为弱变异性。从 4 个模型估算的平均误差检验结果看，Rawls 模型和 Batjes 模型的 ME 值为正，表明两者低估了实测值；Saxton 模型和 Minasny 模型则正好相反，它们高估了实测值。从 ME 的绝对值看，Rawls 模型的值最小，说明该模型最接近实测值。从均方根误差检验结果看，Rawls 模型的最小，其后依次是 Batjes 模型、Minasny 模型和 Saxton 模型。

表 1 4 个 PTFs 田间持水量估算的误差分析

模型	平均值	标准差	变异系数	平均误差	均方根误差
观测值	0.1651	0.0349	0.2117		
Rawls model	0.1592	0.0061	0.0385	0.0058	0.0010
Saxton model	0.3509	0.00002	0.00007	-0.1858	0.0357
Batjes model	0.1258	0.0055	0.0435	0.0392	0.0025
Minasny model	0.2742	0.0138	0.0503	-0.1091	0.0127

4 个模型的建立方式可以用来解释检验结果。Rawls 模型采用了美国各州 2 500 多个土层数据，通过



注：不同字母表示同一土层不同植被类型间田间持水量差异显著($p<0.05$)。

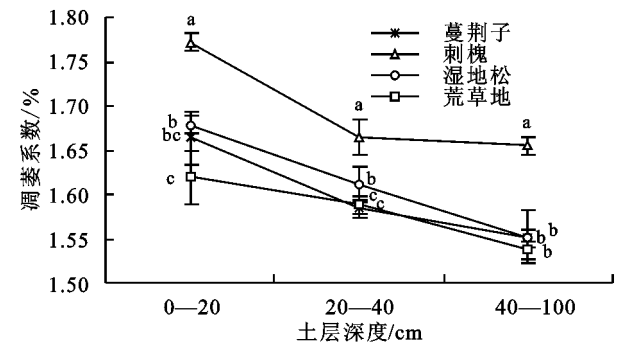
图 1 不同植被类型土壤田间持水量

由图 1 可知，无论哪个土层，3 种人工植被类型样地的田间持水量均远大于荒草地，且达到显著差异 ($p<0.05$)。其中，湿地松样地最大，其次是蔓荆子和刺槐。在 0—20 cm 范围，湿地松样地的田间持水量与蔓荆子和刺槐达到显著差异 ($p<0.05$)；在 20—40 cm 范围，三者互相达到显著差异 ($p<0.05$)；在 40—100 cm 范围，湿地松与蔓荆子差异不显著，二者与刺槐差异显著 ($p<0.05$)。尽管刺槐的有机质含量均大于湿地松和蔓荆子，但由于前者的黏粒含量小

多元线性回归建立了土壤水分含量与土壤粒径及土壤有机质和容重之间的线性分段函数模型，体现了土壤水分含量与这些指标之间的统计关系。这些数据中，其沙粒、粉粒和黏粒含量范围分别是 0.1%~99%，0.1%~93% 和 0.1%~94%，有机质含量范围是 0.1%~12.5%，土壤容重范围是 0.1%~2.09%。可以看出 Rawls 模型数据涵盖了各种质地和有机质含量的农业土壤。Saxton 的研究则从土壤水分传导性角度出发，在 Rawls 模型的基础上进行了改进，剔除了有机质对土壤水分的影响，建立了土壤水分与土壤粒径之间的连续非线性函数模型。显然，沙地土壤中有机质含量对土壤水分的影响不可忽略。Batjes 收集了世界范围内 15 813 个土层数据用于模型建立。尽管数据量很大，但在应用时为了数据的统一，对数据进行了筛选，尤其是当沙粒、粉粒或黏粒含量小于 5% 及有机碳含量小于 0.1% 时被当作了异常值处理。这使得 Batjes 模型在应用范围得到一定的限制。Minasny 和 Hartemink 提出的则是更适合黏粒含量及土壤容重更高、阳离子代换量及有效水分含量更低的热带地区的建议模型。由这些建模方法可以看出，Rawls 模型相比其余 3 种模型具有更广泛的应用范围。这与估算检验的结果是一致的。随后的土壤有效水分估算中，将采用 Rawls 模型进行计算。

2.2 田间持水量与凋萎系数

依据田间持水量观测值及应用 Rawls 模型对不同植被类型 100 cm 土层以内凋萎系数的估算结果，绘制数据图分别见图 1 和图 2。



注：不同字母表示同一土层不同植被类型间凋萎系数差异显著($p<0.05$)。

图 2 不同植被类型土壤凋萎系数

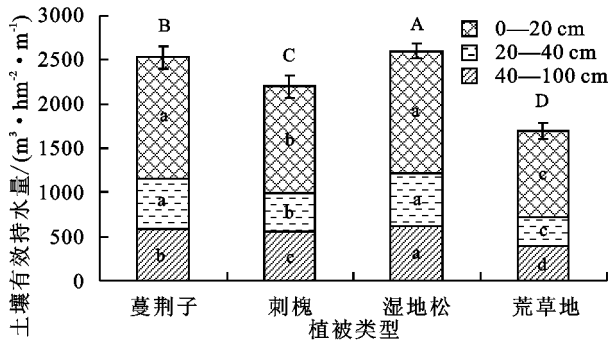
于后二者，导致了其田间持水量小于后二者。这也说明黏粒含量对田间持水量的影响大于有机质。随着土层的加深，4 个样地的田间持水量均随之减小。其中，湿地松和蔓荆子样地在 40 cm 范围内减小幅度较小，在 40—100 cm 范围内减小幅度较大；刺槐和荒草地则是在 40 cm 范围内变化较大，在 40—100 cm 范围内变化更小。

在凋萎系数方面，3 个土层的刺槐样地要显著大于其余 3 个样地 ($p<0.05$) (图 2)。在 0—20 cm 土层中，

湿地松的凋萎系数略高于蔓荆子但不显著,却显著高于荒草地;蔓荆子则略高于荒草地但不显著。在20—40 cm土层,湿地松显著高于蔓荆子和荒草地($p < 0.05$),后二者差异不明显。在40—100 cm土层,湿地松、蔓荆子和荒草地差异均不显著。随着土层的加深,4个样地的凋萎系数均呈下降趋势,这是因为随着土层加深,黏粒含量和有机质含量均呈下降趋势。

2.3 土壤有效持水量

土壤有效持水量是田间持水量与凋萎系数的差值。由于不同土层间的田间持水量与凋萎系数均不相同,所以有效持水量也不相等。本研究计算了不同土层范围内1 hm²面积的土壤有效持水量,结果如图3所示。在0—20 cm土层中,土壤有效持水量由大到小依次为湿地松、蔓荆子、刺槐和荒草地,且均在0.05水平达到显著差异;在20—40 cm土层和40—100 cm土层中,湿地松略大于蔓荆子但不显著,二者在0.05水平显著高于刺槐,而刺槐在0.05水平显著高于荒草地。在整个1 m土层的土体中,4个样地的有效持水量均在0.05水平达到显著差异,其大小顺序依次为湿地松>蔓荆子>刺槐>荒草地。



注:不同小写字母表示同一土层内不同植被类型间有效持水量差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示0—100 cm范围土层内不同植被类型间有效持水量差异显著($p < 0.05$)。

图3 不同植被类型的土壤有效持水量

3 讨论与结论

3.1 土壤转换函数的筛选

土壤水分特征是植被恢复、土壤生态等各领域研究过程中经常涉及的内容^[8]。土壤水分特征可以通过直接测定相关指标进行分析研究,也可以通过模型估算相关指标来研究。田间或实验室测定虽然具有直接测定、数据准确可靠等优点,但也往往费时、费力、成本高^[25-27]。为了弥补这种不足,众多学者尝试通过建立各项指标间相关关系以简化相关参数的获得。土壤转换函数(PTFs)即是其中的一种。它是利用易获得的土壤粒径组成、有机质和容重等参数对其他指标进行估算的有效方法。由于PTFs模型的建立需要大量数据,因而往往是大区域尺度范围建立

的定量模型,当应用到小范围的定量估算时需要对其适用性进行判定。本研究采用地统计方法进行模型验证IP3证来评价模型对研究区的适宜程度。检验的结果显示所选Rawls模型的ME(0.005 8)和RMSE(0.001 0)值均非常低,说明Rawls模型估算值接近于实测值,在一定程度上是适用于本研究范围的。

用于估算土壤有效持水量的PTFs模型有很多,本研究从中挑选可能适用的4个进行对比分析,最终筛选最合适的一个。由结果及分析中可以发现,Rawls模型之所以适用有两方面原因,第一是模型建立时采取的数据量大,第二,也是最关键因素,就是相关参数如黏粒、沙粒等含量范围值大,涵盖了本研究粒径含量范围。其他模型建立虽然也有大数据量,但参数涵盖范围相对较小,与本研究数据范围重叠较少,因而适用性偏差。通过本研究可知,PTFs是一种简单、有效且快速计算土壤水分特性的方法,值得推广使用;在选择PTFs模型时,应尽量选择建模数据量大、数据范围尽量覆盖相应研究的模型。

3.2 田间持水量和凋萎系数

田间持水量是土壤毛管悬着水达到最大时的土壤含水量,亦即为饱和土壤在排除重力水后所能保持的最大含水量,是评价土壤涵养水分能力的一个重要指标^[2,27]。其与土壤有机质与黏粒含量等呈正相关关系,与沙粒含量呈负相关关系^[2,8-9,21]。本研究野外调查时发现,刺槐林下植物物种多样性及生物量均比湿地松更加丰富,实测土壤有机质含量也较湿地松高。但由于刺槐林样地的黏粒含量远低于湿地松林地,导致湿地松林地土壤田间持水量大于刺槐林地,体现出前者比后者有更好的土壤水分条件。如果刺槐与湿地松立地条件一致,则刺槐林土壤将会因为含有更多有机质而拥有更高的涵养水源能力。3种人工植被土壤的田间持水量均高于荒草地,说明南方湖滨沙地通过人工恢复植被,可以较快提高土壤涵养水分能力,恢复土壤储水功能。

凋萎系数是使植物发生永久萎蔫时的最大土壤含水量。在Rawls模型^[21]中,凋萎系数与土壤黏粒含量的0.005倍呈线性正相关,与土壤有机质的0.015 8倍呈线性正相关。这说明有机质含量对凋萎系数的影响要大于黏粒含量影响。因此,尽管刺槐林地土壤黏粒含量低于湿地松和蔓荆子,但有机质含量高于后二者,导致前者的凋萎系数显著高于后二者。从凋萎系数数值体现出3种植物的耐旱性依次是蔓荆子>湿地松>刺槐,这也说明了蔓荆子是更适合亚热带沙地土壤的耐旱植物^[17]。

3.3 不同植被类型土壤有效持水量

土壤的有效持水量是田间持水量与凋萎系数的函数,体现土壤能够提供给植物生长的有效水量程

度。一般认为,土壤黏粒含量越低,土壤能够提供的有效水量越少。对沙地土壤而言,黏粒含量低,土壤胶结能力差,保水蓄水能力也就相对有限。通过生态植被的恢复,可以有效提高土壤的有效持水量,满足植物生长需求。在本研究中,3种植被恢复类型的土壤有效持水量均比荒草地高,说明人工生态恢复的效果,明显高于荒草地,更有利于沙地土壤水分的改善,最终有利于生态环境的改善。从3种人工植被类型对田间持水量、凋萎系数及土壤有效持水量的综合影响及其本身的生理学特性等可知,蔓荆子和湿地松更有利于作为先锋物种,种植于更加干旱的沙地土壤中;针对湿地松水分保持能力较好以及刺槐耐旱性较差的特点,二者可以结合营造混交林。

通过以上分析与讨论,可以初步得到以下主要结论:

(1) Rawls 模型适合鄱阳湖滨沙地土壤水分特征的估算分析,其检验的 ME 和 RMSE 值分别为 0.005 8, 0.001 0。

(2) 不同植被类型 100 cm 土层土壤的有效持水量大小依次为湿地松>蔓荆子>刺槐>荒草地。

参考文献:

- [1] 屠志方,李梦先,孙涛.第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J].林业资源管理,2016(1):1-5,13.
- [2] Suzuki S, Ruaysoongnern S, Chinabut N. Improvement in water holding capacity and structural stability of a sandy soil in northeast Thailand [J]. Arid Land Research and Management, 2007,21:37-49.
- [3] 李红琴,乔小龙,张懿铨,等.封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):195-200.
- [4] 任利东,黄明斌,樊军.不同类型层状土壤持水能力的研究[J].农业工程学报,2013,29(19):105-111.
- [5] 王孟本,柴宝峰,李洪建,等.黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J].林业科学,1999,35(2):7-14.
- [6] 孙婴婴,孙绪博,曹婷婷,等.砒砂岩对毛乌素沙地风沙土储水能力影响的研究[J].水土保持研究,2017,24(6):105-110,121.
- [7] 张强,孙向阳,黄利江,等.毛乌素沙地土壤水分特征曲线和入渗性能的研究[J].林业科学研究,2004,17(S):9-14.
- [8] Batjes N H. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules [J]. Geoderma, 1996,71:31-52.
- [9] Piedallu C, Gégout J C, Bruand A, et al. Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands[J]. Geoderma, 2011, 160:355-366.
- [10] Zhao C L, Shao M A, Jia X X, et al. Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2016,143:1-6.
- [11] 游松财,邸苏闯,袁晔.黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J].自然资源学报,2009,24(3):545-552.
- [12] 施枫芝,赵成义,叶柏松,等.基于 PTFs 的干旱地区土壤饱和导水率的尺度扩展[J].中国沙漠,2014,34(6):1584-1589.
- [13] 王改改,张玉龙,虞娜.砂质土壤持水特性空间变异特征传递函数模型[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2012,31(3):366-369.
- [14] 张英,郑林,黄佳超,等.鄱阳湖沙区香根草生长差异及环境效应[J].水土保持通报,2018,38(3):339-344.
- [15] 曹昀,陆远鸿,朱悦,等.湿地松在鄱阳湖区沙化土地恢复中的试验研究[J].生态环境学报,2017,26(5):741-746.
- [16] 曹昀,杨杰,朱悦,等.鄱阳湖沙化土地湿地松人工林碳蓄积量研究[J].生态环境学报,2016,25(1):15-21.
- [17] 左长清,杨洁,李相玺.江西省鄱阳湖湖滨沙地蔓荆的固沙效益[J].中国水土保持科学,2003,1(2):38-41.
- [18] 段剑,杨洁,刘仁林,等.鄱阳湖滨沙地植物多样性特征[J].中国沙漠,2013,33(4):1034-1040.
- [19] 李兰晖,丁明军,郑林,等.鄱阳湖沙化地区不同下垫面土壤水分动态[J].水土保持通报,2014,34(2):213-217.
- [20] 任黎秀,和艳,杨达源.鄱阳湖湖滨十万余年来沙山的演化[J].地理研究,2008,27(1):128-134.
- [21] Rawls W L, Brakensiek D L, Saxton K E. Estimation of soil water properties[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1982,25:1316-1320.
- [22] Saxton K E, Rawls W L, Rosenberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50:1031-1036.
- [23] Minasny B, Hartemink A E. Predicting soil properties in the tropics[J]. Earth-Science Reviews, 2011,106:52-62.
- [24] Vos B D, Meirvenne M V, Quataert P, et al. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005,69(2):500-510.
- [25] Wösten J H, Genuchten M T V. Using Texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988,52(6):1762-1770.
- [26] Reynolds A C, Jackson T J, Rawls W J. Estimating soil water-holding capacities by linking the Food and Agriculture Organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions[J]. Water Resources Research, 2000, 36(12):3653-3662.
- [27] 赵振磊,李传荣,许景伟,等.黄河三角洲不同刺槐混交林的土壤持水能力[J].水土保持学报,2012,26(3):222-226.