

青海湖克土沙区不同类型沙丘土壤水分的动态变化

鲁瑞洁¹, 唐清亮¹, 桑艳礼¹, 魏殿生^{1,2}, 张登山¹, 石昊¹, 贾飞飞¹, 尚媛¹, 田丽慧¹

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 黑龙江省森林工业总局, 哈尔滨 150008)

摘要:对青海湖湖东克土沙区的土壤水分变化特征及其与降雨之间的关系进行了分析,结果表明:固定沙丘土壤水分随深度的变化较小,采取措施(人工植被+麦草方格沙障)的流动沙丘在不同深度上的变异最大;从 0—80 cm 平均水平看,土壤含水量为固定沙丘>流动沙丘>采取措施的流动沙丘;三种沙丘土壤水分与降雨的时间变化都基本一致,可以分为冻结滞水期(12 月—翌年 3 月)、水分补偿期(4—7 月)和失水期(8—11 月)三个阶段,土壤含水量以夏秋季最高;降水对 0—80 cm 的土壤水分都有影响,对上层土壤的影响更显著,采取措施的流动沙丘主要影响深度为 60 cm,固定沙丘为 20 cm;在流动沙丘上种植人工植被以及布设麦草方格沙障,可以抑制表层土壤水分蒸发,提高表层土壤含水量,在植被恢复前能够有效减少风蚀,对于植物初期生长具有积极意义。

关键词:土壤水分; 流动沙丘; 固定沙丘; 时空变化; 降雨

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)02-0111-05

Dynamic Changes of Soil Moisture in Different Dunes of Ketu Sand Land in Qinghai Lake Basin

LU Rui-jie¹, TANG Qing-liang¹, SANG Yan-li¹, WEI Dian-sheng^{1,2},

ZHANG Deng-shan¹, SHI Hao¹, JIA Fei-fei¹, SHANG Yuan¹, TIAN Li-hui¹

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Forest Industry General Bureau of Heilongjiang Province, Harbin 150008, China)

Abstract: In this paper, we selected three kinds of dunes in Ketu sand land on the east of Qinghai Lake, analyzed the soil moisture, as well as correlations between soil moisture and rainfall. The results show that: soil moisture in fixed dune has less variation along the profile, whereas the largest variation of soil moisture along the profile was observed in active dune with artificial measures (artificial vegetation and straw checkers). During the observation periods, soil moisture of the fixed dune was the highest in 0—80 cm depth, followed by active dune, and active dune with artificial measures. The three kinds of dunes have similar temporal variation trends, which can be divided into three stages such as freezing stagnation period (from December to next March), compensation period (from April to July) and dehydration period (from August to November). Soil moisture is the highest in summer and autumn. The impact of precipitation on the upper soil is more significant, which mainly influences 60 cm depth in the active dune with artificial measures, 20 cm depth in the fixed dune. In addition, our research suggests that the artificial vegetation and straw checkers can inhibit surface soil moisture evaporation, improve surface soil moisture and reduce wind erosion, which is quite important for the initial growth of vegetation before the dune is fixed.

Key words: soil moisture; active dune; fixed dune; tempo-spatial change; rainfall

植被重建是半干旱沙区生态环境恢复的有效途径之一。我国在沙坡头、科尔沁、毛乌素等沙区开展了大规模的人工植被建设,起到良好的防风固沙效

果,然而近年来一些区域出现了“小老树”、土壤干层、周期性植被衰退等现象。有研究表明,随着流动沙丘的逐渐固定,土壤深层的水分状况会恶化,进而抑制

深根性植物的生长和生存^[1-3]。土壤水分分布状况及其量值是干旱、半干旱沙区诸多生态过程的主要制约因子,同时也是沙区退化生态系统恢复与重建的重要依据^[4-6]。受到地形、土壤性质、植被、地下水深度、降雨量、气象因子等诸多因素的影响,土壤水分表现出高度的时空异质性^[7]。目前围绕沙地土壤水分已经开展了较多研究^[8-12],对科尔沁沙地、浑善达克沙地、毛乌素沙地、乌兰布和沙漠等沙区的土壤水分特征有了一定的了解,但有关高寒沙区土壤水分状况的研究相对较少^[13-14]。

位于青藏高原东北部的青海湖是中国面积最大的内陆高原湖泊,最近几十年来,受多种因素影响,土地沙化已经成为湖区重要的生态环境问题之一,湖区沙地及其对湖泊、湿地的影响早已引起关注^[15-17]。20 世纪 80 年代以来,国家及地方政府在湖东的克土沙区采取了多种治沙措施,取得了显著的效果。然而,近年来部分经治理后固定的沙丘植被退化,出现了活化现象。克土沙区具有高寒、多风、半干旱的气候条件,植物对水分具有高度的依赖性,水分成为影响植物生存、生长发育和环境对植被支持力的关键因素。

本文通过研究克土沙区流动沙丘、采取措施的流动沙丘和固定沙丘丘顶 0—80 cm 剖面内土壤水分的时空变化特征及其与降雨的相关关系,力求揭示出高寒地区处于不同演化阶段的三种沙丘类型下土壤水分的变化规律,以期在不引起土壤水分条件恶化的情况下,建立合理的人工植被结构,使流动沙丘朝着自然状态下的固定沙丘发展。

1 研究区概况

克土沙区(图 1)位于青海湖湖东沙地的东北部,行政上属于青海省海晏县,高寒半干旱气候,年均温 -3.1°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 473.6°C ,降雨量 397.4 mm ,蒸发量 1538.4 mm 。每年大风日数 $20\sim 40\text{ d}$,多西北风,主要出现在 $3\sim 5\text{ 月}$ ^[18]。沙区靠近湖岸分布着自然状态下的固定沙丘和半固定沙丘,以及大量经治理后固定的沙丘,远离湖岸、靠近山地的区域以流动沙丘为主。地表沉积物中砂($0.5\sim 0.25\text{ mm}$)和细砂($0.25\sim 0.1\text{ mm}$)占 80% 以上,粗砂和黏粒含量很少。经过野外勘测考察,选择区内典型自然固定沙丘一个,并选择与其海拔相差不大、沙丘形态相似的流动沙丘、采取措施的流动沙丘各一个,沙丘的地表状况如下:

(1)流动沙丘。曾种植小叶杨(*Populus simonii*),现在存活的很少,沙丘仍处于流动状态,偶见沙

蒿(*Artemisia desertorum*)和藁草属(*Carex*)植物,春季植被盖度约为 2%,夏季植被盖度约为 5%。

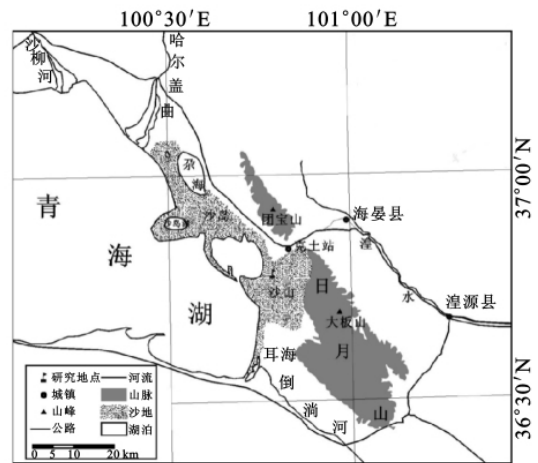


图 1 研究区位置

(2)采取措施的流动沙丘。2007 年设置麦草方格沙障($1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$),2008 年种植沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)($1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$),2009 年直播柠条(*Caragana Korshinskii*),无任何灌溉措施。2010 年 4 月观察时,受流沙掩埋,麦草方格沙障仅出露地表 $2\sim 5\text{ cm}$,盖度约 13%。沙棘长势良好,无干梢,平均株高 66 cm ,植株周边已形成一层比较紧实的物理结皮,春季风沙活动强烈,结皮被流沙所覆盖,盖度约 6%;柠条幼苗大部分被流沙覆盖,只有少数露出地表,植被盖度约为 1%。夏季植被总盖度约为 15%。

(3)固定沙丘。植被以沙蒿为主,高 40 cm ,局部形成灌丛沙堆,另外还有沙棘、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)和藁草属植物等,春季植被盖度约 40%,夏季可达 60%。地表分布有比较疏松的生物结皮。

2 研究方法

在三种类型沙丘丘顶各安置一台 ECH_2O 水分监测仪,对距地表 $10, 20, 40, 60, 80\text{ cm}$ 共 5 个深度的土壤水分(体积含水量)进行监测。同时,在与固定沙丘相邻的丘间地距地 70 cm 高处安装一个雨量筒,实时监测研究区的降雨情况。仪器监测时间为 2009 年 12 月至 2010 年 11 月,数据采集器每 10 min 记录一次数据。由于探头连接松动,流动沙丘 $40\sim 60\text{ cm}$ 缺失 2009 年 12 月和 2010 年 1 月、10 月、11 月数据;采取措施的流动沙丘 $60\sim 80\text{ cm}$ 缺失 2010 年 11 月数据。2010 年 7 月,在各土壤水分监测仪附近,从地表向下在 $0\sim 10, 10\sim 20, 20\sim 40, 40\sim 60, 60\sim 80\text{ cm}$ 深处用环刀采集土壤,封好带回实验室,放入 105°C 烘箱中烘干,称量干重,计算土壤容重。

3 结果与分析

3.1 土壤容重

土壤容重与土壤质地、结构、松紧和有机质含量等多种因素有关。一般情况下,土壤容重小说明土壤孔隙数量多,比较疏松,结构性好,土壤的水分、空气、热量状况良好^[19]。本研究选择的三个沙丘 0—80 cm 土壤容重如表 1 所示。三种不同类型沙丘土壤容重随深度的变化都不大。固定沙丘土壤容重明显低于另外两类沙丘,可能是因为植被定植时间较长,对土壤的改良作用明显,土壤结构性好。流动沙丘与采取措施的流动沙丘差别不大,可能是因为采取措施的流动沙丘采取措施的时间较短,尚未引起土壤性状的变化。

表 1 不同类型沙丘的土壤容重 g/cm ³			
深度/cm	流动沙丘	采取措施的流动沙丘	固定沙丘
0—10	1.63	1.61	1.52
10—20	1.59	1.66	1.46
20—40	1.59	1.51	1.53
40—60	1.52	1.60	1.48
60—80	1.52	1.56	1.46
均值	1.56	1.58	1.49

3.2 土壤水分的空间变化

观测期间土壤平均含水量随深度的变化如图 2 所示。可以看出,固定沙丘在不同深度上的变异最小,采取措施的流动沙丘水分随深度的变化最大。流动沙丘表层土壤含水量较低,形成干沙层,有效抑制了下层水分的蒸发,因此 10 cm 以下土壤含水量较高,基本维持在 9% 左右。采取措施的流动沙丘土壤含水量随深度增加逐渐降低,40 cm 以下接近于流动沙丘表层干沙层的含水量,可能是由于沙棘根系主要分布在 40 cm 以下,植被蒸腾耗水所致。固定沙丘土壤水分随深度变化不明显,在 8.8%~10.4% 之间变化。三种沙丘都是 10—20 cm 土壤含水量最高,可能是因为本区的单次降雨多在 10 mm 以下(观测期间共降雨 41 次,小于 10 mm 的降雨 33 次,占 80% 左右,其降雨量占总降雨量的 42%),对 20 cm 以上土壤水分的补充较大,且该层距地表有一定深度,蒸发相对较弱,同时根系一般也分布在 20 cm 以下,所以该层土壤含水量最高。值得一提的是,采取措施的流动沙丘表层 0—10 cm 含水量较流动沙丘高,没有形成干沙层,说明在流动沙丘上种植人工植被以及布设麦草方格沙障,可以增加表层土壤含水量,能够在植被恢复前有效减少风蚀。

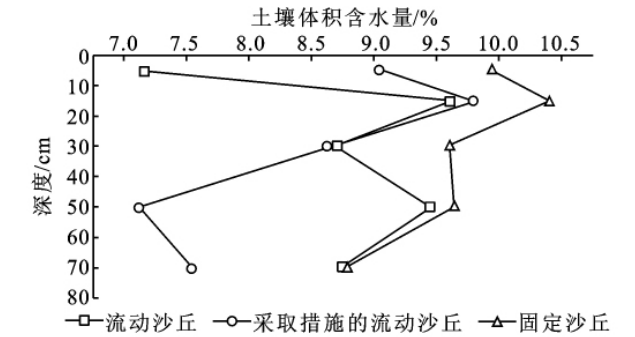


图 2 不同沙丘土壤水分随深度的变化

从 0—80 cm 平均水平看,土壤含水量固定沙丘(9.5%)>流动沙丘(8.8%)>采取措施的流动沙丘(8.2%)。固定沙丘虽然植被盖度大,蒸腾耗水多,但同时植被生长促进了细颗粒物质的沉积,土壤中细颗粒含量高,土壤持水能力强,大部分降水被截留在根系利用层,植被的蓄水保墒作用大于其生长损耗的水分,所以土壤含水量较高。流动沙丘植被覆盖度低,蒸发强烈,但植物生长耗水少,同时表层干沙层抑制了下面水分的蒸发,因此在降水的补充下含水量仅次于固定沙丘。采取措施的流动沙丘地表覆盖度大,蒸发相对较弱,但是生长季植被盖度达 15%,蒸腾耗水较高,而且植被定植的时间短,暂时还没有引起土壤结构的改变,对降水的拦截作用不明显,土壤颗粒较粗,持水能力差,因此即使有降雨的补充,在高蒸腾作用下,土壤水分散失大,土壤含水量较流动沙丘低。

3.3 土壤水分的时间变化

三种沙丘土壤水分随时间的变化均与降雨量的变化比较一致(图 3),只是由于下垫面的差异,影响水分的下渗和蒸发散,导致不同类型沙丘土壤含水量存在一定差异。土壤水分以夏秋季最高,随时间的变化可分为三个时期:(1)12 月—翌年 3 月为冻结滞水期。土壤温度低,土壤含水量为全年最低,并且维持在相对稳定的水平。(2)4—7 月为土壤水分补偿期。土壤含水量逐渐增加。4 月温度回升,土壤解冻,积雪融化,同时还有少量降雨的补充,中下旬植被开始生长,但此时蒸腾耗水量少,所以土壤含水量迅速上升。5 月降雨量有所增加,植被蒸腾作用逐渐增强,土壤含水量增加不大。6—7 月植物进入生长旺季,蒸腾耗水强烈,这一时期为雨季,降雨量大,降雨对土壤水分的补给作用大于土壤水分的散失,土壤含水量仍然呈增加趋势。(3)8—11 月为失水期。土壤含水量较高,呈逐渐下降趋势。8 月降雨量为全年最高,高降水量促进了植物的进一步生长,植物耗水增加,同时气温高,蒸发强烈,土壤含水量降低。9—10 月植物生长衰退,耗水减少,同时有一定的降雨补充,土

壤含水量仍然维持在较高水平。11 月植物普遍枯黄,土壤表面冻结,降雨量很少,降水的补充作用弱,加上冬季风大,蒸发强烈,土壤水分的损耗大,土壤水分呈下降趋势。

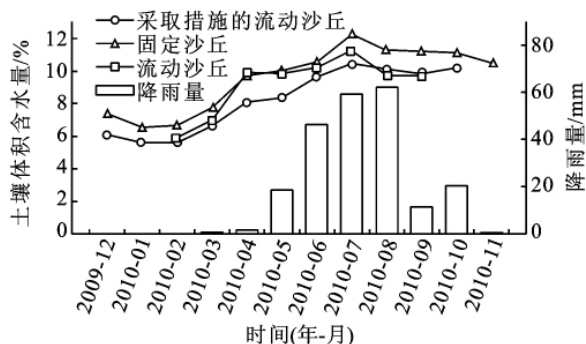


图 3 不同沙丘土壤水分随时间的变化

3.4 土壤水分与降雨量的关系

该区丘间地地下水位一般在 0.5 m 左右,而沙丘高度多数在 7 m 以上,地下水对土壤水分的补给不大,降水是土壤水分的主要来源。沙丘土壤水分与当月降雨量的相关性如表 2 所示。可以看出,三种沙丘不同深度土壤水分都与降雨量显著相关,说明该区 0—80 cm 深度内都受降雨的影响。流动沙丘与降雨量的相关性不如其它两个沙丘显著,可能是因为流动沙丘蒸发强烈,蒸发对土壤水分的影响较大,在一定程度上降低了土壤水分与降水的相关性。采取措施的流动沙丘与降雨量极显著相关的临界深度为 60 cm,而固定沙丘仅为 20 cm,表明前者对降雨的响应更强烈,可能与固定沙丘表层细颗粒物含量高,降水不易下渗有关。总体上看降水对上层土壤含水量的影响较为显著,对深层土壤水分的作用减弱。

表 2 土壤含水量与当月降雨量的相关系数

深度/cm	流动沙丘	采取措施的流动沙丘	固定沙丘
0—10	0.696*	0.801**	0.807**
10—20	0.688*	0.731**	0.760**
20—40	0.673*	0.749**	0.607*
40—60	0.509	0.719**	0.606*
60—80	0.652*	0.716*	0.648*

* 显著性水平检验 $p < 0.01$, * 显著性水平检验 $p < 0.05$ 。

4 讨论

有研究发现固定沙丘由于地表形成结皮,拦截降水,同时植被蒸腾耗水较大,导致土壤水分减少,沙丘退化^[8,20-21]。本研究中固定沙丘土壤含水量最高,流动沙丘次之,采取措施的流动沙丘最低。出现这种差异的原因可能有以下三个方面:(1)克土沙区位于高寒地区,温度低,植物生长缓慢,生长季短,蒸腾耗水量相对较少,降水基本能够满足植被的生长需求。在有降水补充的情况下,由于重力作用,流动沙丘下渗

失水多于固定沙丘^[1],而固定沙丘由于植物根系活动,能够吸收利用有效降水补充的土壤水分,从而阻止了降水条件下土壤深层渗漏的发生^[22],所以导致固定沙丘 0—80 cm 深度内土壤水分高于流动沙丘和采取措施的流动沙丘。研究区天然状态下固定沙丘夏季植被盖度在 60% 左右,土壤含水量是三种类型沙丘中最高的,说明该植被盖度下植被与土壤水分已经达到了动态平衡,植物不仅能充分利用当地的降水,而且能够抑制水分的渗漏,从而将水分储存在较深沙层中。(2)李新荣发现人工固沙区 100 cm 以下土壤水分下降明显^[2],孙建华的研究表明,60—200 cm 流动沙丘与固定沙丘的土壤水分才表现出明显的差异^[21],也就是说在有植被的固沙区,较深层的土壤水分下降比较明显,但是本实验由于观测深度较小,无法比较深层的土壤水分。(3)本研究中采取措施的流动沙丘植物定植时间较短,对土壤的改良以及保水尚无太大作用,但植物生长耗水较多,尤以 40 cm 以下土壤水分减少较明显,所以总的含水量略低于流动沙丘。此外,采取措施的流动沙丘 0—10 cm 含水量较流动沙丘高 2% 左右,这可能是由于人工植被和麦草方格沙障增加了地表的覆盖度(流动沙丘 5%,采取措施的流动沙丘 15%),抑制了土壤水分蒸发,提高了表层土壤含水量。而表层较高的土壤含水量能够有效减少风蚀^[23],也就是说人工植被和麦草沙障不仅能通过自身对风的机械阻力减少风蚀,同时还可能通过提高表层土壤含水量,增加临界起沙风速,从而减少风蚀,这对于植物的初期生长具有积极意义。

5 结论

(1)不同类型沙丘水分的垂直变化趋势不一致。流动沙丘为上低下高型,表层土壤含水量较低,10 cm 以下维持在较高水平;采取措施的流动沙丘为上高下低型,土壤含水量随着深度增加而逐渐降低;固定沙丘为稳定型,土壤水分随深度变化不明显。而各沙丘的平均含水量固定沙丘最高,流动沙丘次之,采取措施的流动沙丘最低。

(2)该区土壤水分与降雨的时间变化基本一致,可以分为三个阶段:冻结滞水期(12 月—翌年 3 月),水分补偿期(4—7 月),失水期(8—11 月)。土壤含水量以夏秋季最高。

(3)三种类型沙丘不同深度的土壤水分与降雨量之间都存在显著的相关关系,但降水对上层土壤的影响更显著,采取措施的流动沙丘主要影响深度为 60 cm,固定沙丘为 20 cm,流动沙丘对降水的响应则不如另外两个沙丘显著。

参考文献:

- [1] 郭柯,董学军,刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点:兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J]. 植物生态学报,2000,24(3):275-279.
- [2] 李新荣,马凤云,龙立群,等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠,2001,21(3):217-222.
- [3] 肖洪浪,李新荣,段争虎,等. 流沙固定过程中土壤—植被系统演变对水环境的影响[J]. 土壤学报,2003,40(6):809-814.
- [4] Berndtsson R, Nodomi K. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand[J]. Journal of Hydrology,1996,185:221-240.
- [5] 冯起,程国栋. 我国沙地水分分布状况及其意义[J]. 土壤学报,1999,36(2):225-236.
- [6] 石莎,马凤云,刘立超,等. 沙坡头地区不同植被结构对沙地土壤水分的影响[J]. 中央民族大学学报:自然科学版,2004,13(2):137-141.
- [7] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology,1998,210(1/4):259-281.
- [8] 张继贤,徐斌. 科尔沁草原南部不同类型沙丘水分研究[J]. 中国沙漠,1985,5(3):33-39.
- [9] 陈有君,红梅,李绍良,等. 浑善达克沙地不同植被下的土壤水分状况[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(1):68-73.
- [10] 秦佳琪,托亚,叶冬梅,等. 乌兰布和沙漠不同沙地类型土壤水分特征的研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2004,25(2):23-26.
- [11] 李禄军,蒋志荣,车克钧,等. 绿洲—荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J]. 水土保持学报,2007,21(1):123-127.
- [12] 崔利强,吴波,杨文斌,等. 毛乌素沙地东南缘不同植被盖度下土壤水分特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(2):177-182.
- [13] 李元寿,王根绪,丁永建,等. 青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J]. 水科学进展,2008,19(1):61-67.
- [14] 刘安花,李英年,张法伟,等. 高寒矮蒿草草甸植物生长季土壤水分动态变化规律[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(10):125-130.
- [15] 施雅风,陈梦熊,李维质,等. 青海湖及其附近地区自然地理(着重地貌)的初步考察[J]. 地理学报,1958,24(1):33-48.
- [16] 徐叔鹰,徐德馥. 青海湖东岸的风沙堆积[J]. 中国沙漠,1983,3(3):11-17.
- [17] 师永民,王新民,宋春晖. 青海湖湖区风成沙堆积[J]. 沉积学报,1996,14(增刊):234-238.
- [18] 朱秀莲. 海晏县沙化现状调查及治理对策[J]. 青海草业,2009,18(2):40-42.
- [19] 王翔宇,张进虎,丁国栋,等. 沙地土壤水分特征及水分时空动态分析[J]. 水土保持学报,2008,22(6):222-227.
- [20] 吕贻忠,胡克林,李保国. 毛乌素沙地不同沙丘土壤水分的时空变异[J]. 土壤学报,2006,43(1):152-154.
- [21] 孙建华,刘建军,康博文,等. 陕北毛乌素沙地土壤水分时空变异规律研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(2):244-247.
- [22] 王新平,张志山,张景光,等. 荒漠植被影响土壤水文过程研究述评[J]. 中国沙漠,2005,25(2):196-201.
- [23] 移小勇,赵哈林,李玉霖,等. 科尔沁沙地不同风沙土的风蚀特征[J]. 水土保持学报,2006,20(2):10-13,53.
- ~~~~~
- (上接第110页)
- [4] Yuan X Y, Chai X R, Gao R T, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter in a county scale agricultural ecosystem[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research,2007,50(5):1157-1168.
- [5] Liu X M, Zhao K L, Xu J M, et al. Spatial variability of soil organic matter and nutrients in paddy fields at various scales in Southeast China[J]. Environmental Geology,2008,53(5):1139-1147.
- [6] 王淑英,路苹,王建立. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征:以北京市平谷区为例[J]. 生态学报,2008,28(10):4957-4964.
- [7] 陈光,贺立源,詹向雯. 耕地养分空间插值技术与合理采样密度的比较研究[J]. 土壤通报,2008,39(5):1007-1011.
- [8] 潘瑜春,刘巧芹,阎波杰,等. 采样尺度对土壤养分空间变异分析的影响[J]. 土壤通报,2008,41(2):257-262.
- [9] 赵军,刘焕军,隋跃宇. 农田黑土有机质和速效氮磷不同尺度空间异质性分析[J]. 水土保持学报,2006,20(1):41-45.
- [10] 杨奇勇,杨劲松. 不同尺度下耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征[J]. 水土保持学报,2010,24(3):100-104.
- [11] 赵彦锋,陈杰,齐力,等. 不同采样尺度下土壤图和Kriging 法的空间估值精度比较[J]. 土壤通报,2011,42(2):872-878.
- [12] 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[J]. 农业工程学报,2005,21(8):11-16.
- [13] 冯娜娜,李廷轩,张锡洲. 不同尺度下低山茶园土壤颗粒组成空间变异性特征[J]. 水土保持学报,2006,20(3):123-128.
- [14] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Tai Wan soil[J]. Soil Science,1997,162(4):151-162.
- [15] Bake L, Euison D. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method[J]. Geoderma,2008,144(1/2):212-224.