

土石混合介质饱和和导水率的研究*

周蓓蓓^{1,2}, 邵明安^{1,2,*}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 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 杨陵 712100)

摘要: 采用恒定水头法对土石混合介质的饱和和导水率进行测定, 分析不同碎石含量及碎石直径对饱和和导水率的影响, 同时利用实测值对 Peck-Watson 及 Bouwer-Rice 两个传统估算方程的估测精度进行比较。结果表明: (1) 饱和和导水率随碎石含量先增大后减小, 且两者呈二项式关系; (2) 饱和和导水率随碎石直径增大而减小, 两者呈幂函数关系; (3) 碎石直径介于 1.0 ~ 5.0 cm 时, Bouwer-Rice 和 Peck-Watson 方程对饱和和导水率的估算结果均大于实测值。

关键词: 碎石直径; 碎石含量; Peck-Watson 方程; Bouwer-Rice 方程

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2006)06-0062-05

Study on Saturated Hydraulic Conductivity of Soil Stone Mixtures

ZHOU Bei-bei^{1,2}, SHAO Ming-an^{1,2,*}

(1. College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on the experiment of the constant head method for saturated hydraulic conductivity, the effects of soil-stone ratios and stone sizes on K_s were studied. Meanwhile, we calculated the K_s with Peck-Watson and Bouwer-Rice equations respectively, then compared the results with the measured data. The results show that: K_s firstly decreases with the increases of the stone contents, and then increases. The relation between them follows binomial function; K_s decreases with the increases of the mean diameters of the stones; the relation between them follows index function. The values calculated by the equation of Peck-Watson and Bouwer-Rice are much greater than measured data when the stone sizes are between 1.0 ~ 5.0 cm.

Key words: stone sizes; stone contents; Peck-Watson equation; Bouwer-Rice equation

在计算土壤剖面水的通量及灌溉、排水系统工程中, 饱和和导水率是一个重要的参数^[1,2,3]。目前, 国内众多学者已经就饱和和导水率进行了大量的研究, 主要集中在直径小于 2 mm 的土样^[4,5,6]。事实上, 进行水利工程的河道或土壤由于搬运和沉积作用经常含有不同含量及直径的碎石。碎石的存在改变了土壤水分的运动通道和过水断面, 理论上土石混合介质的水分运移过程较均质土壤更为复杂。针对这一状况, 国内学者根据土石混合介质基本物理性质, 如容重、孔隙度、水分含量等对混合介质的饱和和导水率进行了研究, 其中作为重要影响因素之一的碎石含量逐渐受到人们的重视。Petersen(1968)年曾指出, 碎石含量较其他影响因素更能影响土壤水分特性^[6]。然而因为取样土壤的空间变异性及碎石含量、物理性质的差异性使所得结果不一致, 甚至相互矛盾。Peck 和 Watson(1979)首先利用互不发生反应的球型介质对饱和和导水率进行分析, 发现随碎石含量增加饱和和导水率逐渐减小^[7]。吕国安等(2000)研究表明, 碎石含量较多的偏壤土饱和和导水率较小^[3]。Sauer 和 Logsdon(2002)利用单环和盘式入渗仪测定了碎石岩石土壤的导水能力, 结果表明饱和和导水率随碎石含量的增加而增加^[9]。同时对于碎石直径对饱和和导水率影响的研究较少。由于混合介质需要较长时间才能达到稳定水流状态, 费时耗力。因此, 国外学者们提出了针对混和介质饱和和导水率估算的研究理论, 其中 Peck 和 Watson(1976)推出了以碎石体积百分比估算饱和和导水率的方程, Bouwer 和 Rice(1984)提出了利用孔隙比估算饱和和导水率的 Bouwer-Rice 方程^[10], 使饱和和导水率的试验研究简单化, 但其估算结果精确性尚不清楚。

因此, 本文以土石混合介质为研究对象, 旨从试验上综合地揭示碎石含量及直径对土石混合介质饱和和导水率的影响, 为进一步开展土石混合介质水分养分运移的深入研究提供参考。同时, 利用 Peck-Watson 方程及

* 收稿日期: 2006-06-08 * 通讯作者

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479063, 40025106和90102012)

作者简介: 周蓓蓓, 女, 生于1982年, 博士研究生。研究方向为农业生态学。

Bouwer-Rice 方程分别对不同碎石含量及直径的土石混合介质的饱和导水率进行估算, 并与实测结果进行对比, 分析两方程估算结果的精确性。

1 基本原理

1.1 试验基本原理

若土壤是各向同性的、均匀的多孔介质, 在整个流水区内水流是连续的, 环境温度恒定, 则水分在土体中的运动服从达西定律(Darcy's law), 表示为:

$$q = K_s \cdot H / L \quad (1)$$

式中: q —— 通量(cm/min); H —— 渗流路径始末的总水头差(cm); L —— 渗流路径的直线长度(cm); H/L —— 相应的水力梯度; K_s —— 单位梯度下的通量, 也即饱和导水率(cm/min)。

$$q = Q / A t \quad (2)$$

式中: Q —— 渗透量(ml); A —— 渗透横截面积(cm^2); t —— 渗透时间(min)。

由(1)式和(2)式可得:
$$K_s = Q L / A t H \times 100 \quad (3)$$

1.2 饱和导水率估算模型

Peck 和 Watson(1979)以互不反应的球体为传导介质进行研究分析, 结果发现在碎石导水率为零的情况下, 饱和导水率与碎石体积的关系为:

$$K_b / K_s = 2(1 - R_v) / (2 + R_v) \quad (4)$$

式中: K_b —— 含有碎石的土壤饱和导水率(g/s); K_s —— 均质土壤的饱和导水率(g/s); R_v —— 碎石的体积含量。

事实上, 碎石的体积测定费时费力, 碎石含量较多时测定就更加困难。Flint 和 Childs(1984)提出了砾石的体积百分比和质量百分比之间的函数关系, 该关系可表示为:

$$R_v = a(R_w) / [1 - R_w(1 - 3a/2)] \quad (5)$$

式中: R_w —— 砾石的质量含量; a —— 土样和混合介质的容重比。

将方程(5)代入方程(4)中, 得到了关于砾石质量百分比的方程, 因此 Peck-Watson 方程可写为:

$$K_b / K_s = (1 - R_w) / [1 - R_w(1 - 3a/2)] \quad (6)$$

同时, Bonwer 和 Rice(1984)提出了以孔隙比为函数估算饱和导水率的方程, 该方程为:

$$K_b / K_s = e_b / e_s \quad (7)$$

式中: e_b 为混合介质的孔隙度; e_s 为土样的孔隙度。

2 试验设置与方法

2.1 供试土样

本文供试样为土石混合介质, 混合介质中的土壤样品为土娄土与渭河滩沙土的混合土样。土娄土(钙积土垫旱耕人为土)采自西北农林科技大学农作一站试验地(休闲), 在试验田内随机抽取60个约 2 m^2 的正方形区域, 除去耕层10 cm左右土壤, 用小铲铲平, 取30 cm深。土样充分风干后粉碎, 过2 mm不锈钢筛, 初始重量含水量为1%。沙土采自杨凌渭河滩, 风干后以质量比3:7与土娄土均匀混合, 利用英国马尔文公司生产的MS2000激光粒度分析仪进行颗粒分析, 根据国际土壤颗粒质地分类标准, 供试土样为沙质壤土。试验所用碎石采自陕西杨凌渭河滩, 洗净风干后用不同直径的不锈钢筛将碎石筛分成四组直径范围, 分别介于0.2~0.5 cm, 0.5~1 cm, 1.0~2.0 cm, 2.0~3.0 cm。

2.2 试验方法与过程

本文采用垂直定水头法测定混合介质的饱和导水率。为便于观察试验过程, 混合介质的填装柱选用厚1 cm的有机玻璃柱制作, 内径30 cm、高55 cm, 底部有机玻璃板均匀分布0.5 mm细孔; 供水马氏瓶采用内径15 cm, 高50 cm有机玻璃柱制作, 供水水头控制在9 cm左右。

将土样与上述四组不同直径范围的碎石分别按质量比例9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6均匀混合, 共设置6个处理, 同时为了与均质土壤饱和导水率进行比较, 另设一组不加碎石的对照试验, 每组处理重复3个。将混合介质均匀混合后按土样容重 $1.43 \text{ g}/\text{cm}^3$, 碎石容重 $2.87 \text{ g}/\text{cm}^3$ 分层(5 cm)称重, 装入有机玻璃柱中。有机玻璃柱底部填放滤纸和纱布, 防止土样颗粒流失, 试验过程保持恒定的水头, 混合介质充分饱和后, 用150 ml容量瓶收集出流液, 同时记录收集150 ml出流液所需时间。

3 结果与讨论

3.1 碎石含量及直径对饱和导水率的影响

达西定律是达西(1856)通过饱和砂层的渗透试验,得出的通量 q 或渗流速率 v 和水力梯度成正比的定律,且一些学者指出,达西定律是在均质土壤恒定水流状态下得出的,若用于非均质土壤则不适合。事实上,本试验中碎石与土壤混合均匀,饱和条件下呈恒定水流状态,因此,达西定律对于本试验同样适合。本试验将从不同碎石含量及碎石直径对土壤饱和导水率的影响进行研究。

3.1.1 不同碎石含量对饱和导水率的影响 为了便于比较,碎石的质量含量用小数表示。根据实测数据,将不同碎石含量的饱和导水率的实测点绘于图1。由图1可见,在测定饱和导水率的碎石含量范围内,饱和导水率随碎石含量先减小而后增大。当碎石直径介于0.2~1.0 cm时,碎石含量为50%时饱和导水率达到最低;碎石直径介于1.0~5.0 cm时,碎石含量达到40%时饱和导水率达到最低。这可能因为在碎石直径一定条件下,随着碎石含量的增加,土壤水分运动通道更加复杂,实际过水断面(即孔隙和土粒所占面积总和)减少,同时大孔隙数量增加。达西定律中的水力梯度是按两点间直线距离计算的,而不是按水分的实际流程计算。随碎石含量增加,流程愈加弯曲,实际梯度愈小,因此将导致饱和导水率降低;同时,实际过水断面的减少使得单位时间内通过单位土壤面积的水量也随之降低;然而大孔隙的产生促进了水分流动,使得饱和导水率随之增大。当前两个因素的效应大于大孔隙作用时,饱和导水率降低,反之增大;在二者效应相抵消时,饱和导水率达到最小。因此,本试验中的饱和导水率并没有一直随碎石含量增大而减小,而出现50%的碎石含量<60%的碎石含量的现象。Brakensiek(1984)等对碎石含量在0~50%范围内的土壤饱和导水率进行研究发现,饱和导水率随碎石含量增大而减小,但并未对更高碎石含量的土壤进行深入研究;Bouwer等通过试验研究指出,饱和含水量随碎石含量的增加先减小后增大,在碎石含量达到50%时达到最小^[10],与本文试验结果相似。

由图1还可以看出,在碎石直径较小时(0.2~1.0 cm)时,过水断面、水分通道及大孔隙三者对饱和导水率的综合影响变化趋势较大,饱和导水率随碎石含量变化明显;当碎石直径较大(1.0~5.0 cm)时,三者综合影响较小,饱和导水率变化趋势较平缓。

为进一步研究其变化特征,根据曲线的抛物线变化趋势,利用二项式对试验结果进行拟合,即:

$$K_s = ax^2 + bx + c \quad (8)$$

式中: K_s ——饱和导水率; x ——碎石质量百分比; a, b, c ——均为拟合系数。拟合结果见表1。

经统计检验,均达到显著水平(取显著水平为0.01),由相关系数来看,上述4组相关系数均大于临界相关系数 $r_d = 0.875$,因此,二项式可以反映取样直径与测定的饱和导水率间的变化特征。

3.1.2 不同碎石直径对饱和导水率的影响 为了简化研究过程,假设各粒级的碎石直径均匀,采用碎石平均直径为研究对象。各个粒径等级的平均直径可以通过筛选碎石的筛子的直径进行确定:

$$MD = (DM_{\max} + DM_{\min}) / 2 \quad (9)$$

式中: MD ——平均直径; DM_{\max} ——同一粒径级别中较大碎石粒径; DM_{\min} ——同一粒径级别中较小碎石粒径。

如前所述,将饱和导水率随碎石平均直径的变化趋势绘于图2。由图2可以看出,在试验所测定的碎石直径

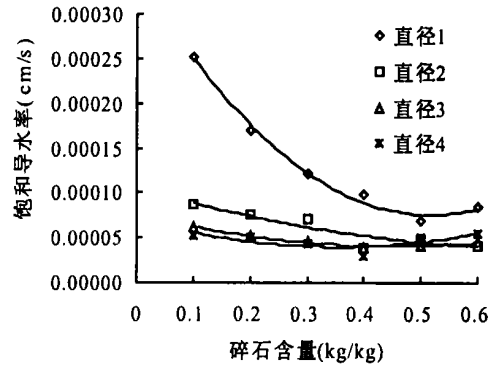


图1 不同碎石质量百分比对饱和导水率的影响

Figure 2: A line graph showing the relationship between saturated hydraulic conductivity (cm/s) on the y-axis (ranging from 0.00000 to 0.00030) and stone diameter (cm) on the x-axis (ranging from 0 to 5). Six data series are plotted for different stone contents: 含量0.1 (diamonds), 含量0.2 (squares), 含量0.3 (triangles), 含量0.4 (crosses), 含量0.5 (plus signs), and 含量0.6 (circles). All series show a downward trend as stone diameter increases. The 含量0.1 series starts at approximately 0.00025 at 1 cm and drops to about 0.00005 at 5 cm. The other series start lower and drop to between 0.00003 and 0.00006 at 5 cm.

表1 碎石直径一定时,不同碎石含量对饱和导水率影响的参数拟合结果

拟合参数	石径0.2~1.0cm	石径1.0~3.0cm	石径3.0~4.0cm	石径4.0~5.0cm
a	0.001	0.0001	0.0002	0.0002
b	0.001	0.002	0.0002	0.0002
c	0.0003	0.0001	8×10^{-5}	7×10^{-5}
r^2	0.9931	0.8915	0.8845	0.9615

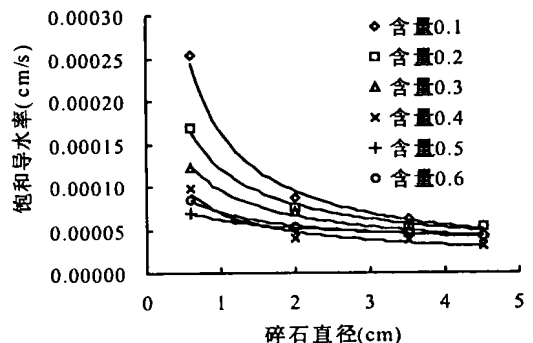


图2 不同碎石直径对饱和导水率的影响

范围内, 饱和导水率随碎石直径增大而减小。Cousin(1992)指出, 碎石的存在减少了过水断面, 且随着碎石的直径增大更加显著, 当碎石直径无限小接近于土壤颗粒时, 饱和导水率接近于不含碎石土样的结果^[8]; 同时, 由图2同样可以看出, 在碎石含量较低时, 饱和导水率随碎石直径增大而减小的变化趋势明显, 曲线坡度较大; 当碎石含量较大时, 饱和导水率随碎石直径变化的曲线平缓, 碎石含量为40%, 50%, 60%时, 曲线落差较小, 碎石直径对饱和导水率的影响甚微, 饱和导水率介于 $10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$ 之间。土壤饱和导水率在碎石含量较高时, 随碎石直径不断增大, 实际过水断面面积接近极限小临界值, 达到极限临界值时, 饱和导水率将不再随碎石直径变化。

进一步研究碎石直径与混合介质的饱和导水率的关系, 根据曲线的形状, 采用幂函数对碎石直径与饱和导水率变化过程的曲线进行拟合, 即:

$$K_s = aD^b \quad (10)$$

式中: K_s ——饱和导水率; D ——一定粒级碎石的平均直径; a, b 为拟合参数。

拟合结果见表2。与前类似, 取显著水平为0.01。由表2可见, 对于

表2 不同碎石直径的饱和导水率的参数拟合结果

拟合参数	土石比					
	碎石含量 10%	碎石含量 20%	碎石含量 30%	碎石含量 40%	碎石含量 50%	碎石含量 60%
a	0.0002	0.0001	0.0001	7×10^{-5}	7×10^{-5}	6×10^{-5}
b	-0.7996	-0.6409	-0.5395	-0.5553	-0.3487	-0.3487
r	0.9943	0.9832	0.9833	0.9919	0.9990	0.9891

各碎石直径范围的混合介质的饱和导水率与碎石平均直径拟合, 其相关系数均大于临界相关系数 $r_d = 0.983$, 说明以幂函数确定的相关关系显著。

本文针对碎石含量及直径对土壤饱和导水率分别进行分析研究, 事实上, 土壤中碎石含量及直径对饱和导水率的影响是同时存在的。因此, 综合式(5)、(7)可以得到碎石的存在对饱和导水率的影响方程, 即:

$$K_s = (ax^2 + bx + c) \cdot D^n \quad (11)$$

式中: a, b, c, n ——拟合参数。

利用 Sigmploit2001对方程(11)检验, 显著水平小于0.0001, 因此方程(10)确定的碎石含量及直径与饱和导水率的相关关系显著。

3.2 饱和导水率的估算与比较

采用 Peck-Watson 和 Bouwer-Rice 两个方程对饱和导水率进行估算, 结果见图3。由图3可知, 两个方程估算的结果均高于实测值, 其中 Peck-Watson 方程估算的结果较 Bouwer-Rice 方程估算结果偏大。由图3同样可以看出, 在碎石直径介于0.2~1.0 cm时, 两个方程的估算结果接近实测数值, 且 Bouwer-Rice 方程估算的结果更精确。

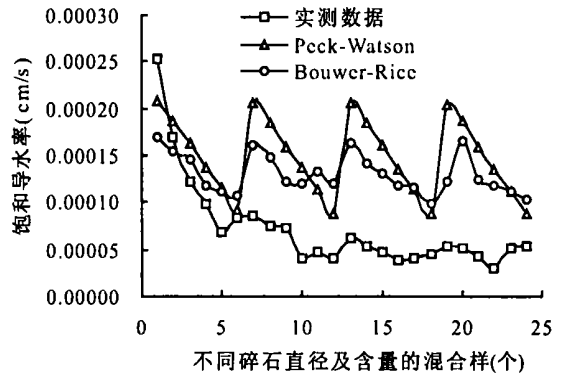


图3 饱和导水率的估算值与实测值比较

随碎石直径逐渐增大, 两个方程仅能描述出饱和导水率随碎石含量变化的趋势, 估测结果偏大, 无法反映碎石直径的实际影响效果。Bouwer(1984)指出, Peck-Watson 方程对饱和导水率的估计值偏大, 尤其是碎石含量较高时, 偏差更加明显^[10]。Dunn 等(1984)曾指出可以将试验过的所有尺寸的碎石直径进行平均, 利用 Peck-Watson 方程估算出一个平均值, 结果会较精确^[11]。Peck-Watson 方程和 Bouwer-Rice 方程对饱和导水率估算结果产生误差的主要原因可能是, 方程仅仅依据碎石的质量百分比或混合介质的孔隙状况进行估算, 未能充分分析其他影响因素。一些学者指出, 对含有碎石的土壤饱和导水率的估算应该针对非扰动土进行, 然而含有碎石的原状土柱极不易获得。因此, 人们通常对扰动土的饱和导水率进行分析, 得到粗略的信息。Peck-Watson 和 Bouwer 方程虽估测结果偏大, 但仍能提供饱和导水率的一些粗略信息。我们可以利用估算的饱和导水率, 计算表层积水或污水入渗过程的水分再分布, 并预测河道或土壤表层积水的渗流情况。同样我们可以利用 Peck-Watson 和 Bouwer-Rice 方程对非饱和导水率进行研究。

4 讨论

由上述结果分析可知, 饱和导水率受碎石含量和直径的影响较大。试验过程中均质土壤与混合介质中的土壤容重保持一致, 且介质中的碎石导水率接近于零, 所以主要差别在于孔隙分布在微观尺度上存在空间变异性^[8], 碎石直径越大, 含量越高, 孔隙不均匀性的概率越大, 从而导致水分通道复杂, 实际过水断面减少。因此随

碎石含量和直径增大,饱和导水率变化明显。

同时,在本研究中,利用达西定律计算混合介质的饱和导水率,达西定律只适用各向同性均质多孔介质,且水流为连续的层流,因此在本研究中的混合介质严格要求土石混合均匀,而由于人为原因造成混合介质的结构不均匀性仍是不可避免的。这些随机的孔隙将改变混合介质中的水流路径,在土壤中形成优先流^[12],在这种情况下,达西定律是不适应的。因此进一步研究优先流对饱和导水率的影响还有待加强。目前,由于科技快速的发展,CT扫描已经在土壤结构研究中得到发展^[13],它对土石混合介质的研究也会起很大促进作用。目前,国内对混合介质的研究还尚未起步,因此,如何发展研究土石混合介质性质将是我们今后研究的主攻方向。

5 结 论

本文采取恒定水头法,通过选取6种碎石含量及4种碎石直径,对含有碎石的土壤饱和导水率进行了测定和分析。分析结果表明:饱和导水率随碎石含量先增大后减小,且与碎石含量成二项式关系;饱和导水率随碎石直径增大而减小,与碎石直径成指数函数关系;利用 Peck-Watson 和 Bouwer-Rice 方程对饱和导水率进行估算,碎石直径介于0.2~1.0 cm 时,结果较精确,碎石直径介于1.0~5.0 cm 时,估算结果偏大。

参考文献:

- [1] Fare A, Alva A K, Kedi-Kizza. P N, et al. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and guelph permeameter[J]. Soil Sci., 2000, 165(10): 768- 777.
- [2] Kammar R S, Riziv H A, Ahemd M, et al. Measurement of field-saturated hydraulic conductivity by using guelph and velocity permeameter transaction of the ASAE[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 32(6): 1885- 1890.
- [3] 吕国安,陈明亮,王春潮.丹江口库区石渣土土壤水分特性研究[J].华中农业大学学报,2000,19(4): 342- 345.
- [4] Mehuy G R, Stolzy L H, Letey J, Weeks L V. Effect of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soils [J]. Soil Sci. Soc. Proceeding, 1975, 39: 37- 42.
- [5] Epstein E, Grant W J, Struchtemeyer R A. Effects of stones on runoff, erosion and soil moisture[J]. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1966, 30: 638- 640.
- [6] Petersen G W, Gunningham R L, Matelaki R P. Moisture characteristics of Pennsylvania soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1968, 32: 866- 870.
- [7] Peck A J, Watson J D, Hydraulic conductivity and flow in non-uniform soil. In: Workshop on soil Physics and field heterogeneity[J]. CSIRO Div. of Environmental Mechanics, Canberra, 1979, 31- 39.
- [8] Cousin I, Nicoulland B, Coutandeur C. Influence of rock fragment on the water retention and waterpercolation in a calcareous soil[J]. Catena, 2003, 53: 97- 114.
- [9] Sauer T J, Sally D L. Hydraulic and physical properties of stone soils in a small watershed[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66: 1947- 1956.
- [10] Bouwer H, Rice R C. Hydraulic properties of stony vadose zones[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48: 736- 740.
- [11] Dum A J, Mehuy G R. Relationship between gravel content of soils and saturated hydraulic conductivity in laboratory tests [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48: 736- 740.
- [12] 秦耀东,胡克林.大孔隙对农田耕作层饱和导水率的影响[J].水科学进展,1998,9(2): 107- 111.
- [13] 李德成, Velde B, 张桃林.利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度[J].土壤学报,2003,40(5): 678- 682.

上接第5页

- [9] 金平华,濮励杰,王金磊,等.¹³⁷Cs法应用于典型流域土壤侵蚀的初步研究——以太湖流域上游西苕溪为例[J].自然资源学报,2004,19(1): 47- 54.
- [10] Lu X X, Higgitt D L. Estimating erosion rates on sloping agricultural land in the Yangtze Three Gorges, China, from cesium-137 measurements[J]. Catena, 2000, 39: 33- 51.
- [11] Zhang Xinbao, Zhang Yiyun, Wen Anbang, et al. Assessment of soil losses on cultivated land by using ¹³⁷Cs technique in the upper Yangtze River Basin of China[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69: 99- 106.
- [12] 何太蓉.三峡库区现代地貌过程研究——以草堂河流域现代坡地过程研究为例[D].南京:南京大学,2004.78- 80.
- [13] Walling D E, He Q, Whelan P A. Using ¹³⁷Cs measurements to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small Devon catchments[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69: 27- 43.
- [14] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,1997.9- 12.