

降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响

吴冰¹, 朱元骏², 邵明安³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 通过室内模拟降雨研究降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响。结果表明: 整个降雨过程中, 60 mm/h 的降雨强度下, 产沙率变化相对平稳, 90 mm/h 和 120 mm/h 的降雨强度下, 土壤产沙率的变化均因有细沟而产生波动, 120 mm/h 的降雨强度下, 细沟出现的时间较 90 mm/h 的降雨强度提前了 5~20 min; 降雨强度的增加导致土壤总产沙量也显著增加, 当降雨强度从 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时, 总产沙量的增加量是降雨强度从 60 mm/h 增加到 90 mm/h 时总产沙量增加量的 0.83~2.82 倍; 随着降雨强度的增加, 土壤的入渗率有减小的趋势。Kostiakov 模型和 Horton 模型均可以很好模拟 3 种降雨强度下含砾石土壤的入渗过程, 而在 60 mm/h 的降雨强度下, Horton 模型优于 Kostiakov 模型, 在 90 mm/h 和 120 mm/h 的降雨强度下, Kostiakov 模型优于 Horton 模型。

关键词: 降雨强度; 产沙率; 入渗; 含砾石土壤

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2011)06-0087-05

Effect of Rainfall Intensity on Sediment Yield and Infiltration on Stony Soils

WU Bing¹, ZHU Yuan-jun², SHAO Ming-an³

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: The sediment yield and infiltration are affected by rainfall intensity based on simulated rainfalls. The results showed that the sediment delivery rate changed smoothly under rainfall intensity of 60 mm/h and the sediment delivery rate fluctuated due to rill during rainfall, the appearance of rill need more time of 5~20 minutes under rainfall intensity of 90 mm/h than that under rainfall intensity of 120 mm/h, the total sediment yield was increased obviously with the addition of rainfall intensity, the increased quantity of total sediment yield from 60 mm/h of the rainfall intensity to 90 mm/h was 0.83~2.82 times more than that from 90 mm/h of the rainfall intensity to 120 mm/h; with the increasing of the rainfall intensity, the infiltration rate was decreasing. The rainfall infiltration process in soil containing gravels under three rainfall intensities could be well simulated by the experiential infiltration model of Kostiakov and Horton. Horton model showed better fitting effect of water infiltration process under rainfall intensity of 60 mm/h, Kostiakov model showed the fine fitting effect under the rainfall intensity of 90 mm/h and 120 mm/h.

Key words: rainfall intensity; sediment delivery rate; infiltration; stony soil

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一, 由于成土过程、土壤侵蚀及人为活动等各方面因素的共同作用导致土壤地表及土壤内部镶嵌了粒径不同的砾石^[1-4], 如我国黄土高原北部地区出现了不同风化程度的钙结核。土壤中砾石的存在改变了土壤结构及物理性质^[5], 影响了土壤侵蚀产沙及入渗过程^[6-7]。国内外学者对含砾石土壤做了一些研究, 有国外学者通过室内试验表明砾石的存在更易形成强烈的土壤侵蚀^[8], 王慧芳等通过一维垂直定水头法研究了土石混合介质的入渗过程^[9-10], 而朱元骏等曾经在恒定降雨强度下对不同碎石含量的土壤入渗及产沙进行了初步研究^[11], 然而, 关于降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响研究却鲜见报道。实际上, 降雨强度一方面会改变雨滴对土壤颗粒的击打能力, 另一方面降雨强度会通过改变上方来水量影

收稿日期: 2011-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(40801104)

作者简介: 吴冰(1987—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤水分环境的研究。E-mail: wubing1099@163.com

通讯作者: 朱元骏(1978—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤水分运动及坡面水土过程的研究。E-mail: zhuyuanjun@foxmail.com

响整个坡面的水土过程。因此,研究含砾石土壤在变雨强条件下的土壤侵蚀及入渗过程,无疑会加深人们对含砾石土壤中水土过程的理解。本文采用模拟降雨试验,研究降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响,希望能为建立该类型土壤侵蚀过程的模拟及水土资源的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2009 年 7—8 月及 2010 年 5—10 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅侧喷 2 区进行,降雨高度约 16 m,降雨均匀度约 90%(率定雨强后的降雨均匀度)。选用规格为 3 m(长)×1 m(宽)×0.25 m(深)的自制铁质土槽模拟坡面,土槽可调节坡度,一侧设有集流口。供试土壤选自陕西杨凌农田 0—50 cm 的表层土壤,土壤质地为壤质壤土,其中 2~0.02 mm 粒径的颗粒占 26.79%,0.02~0.002 mm 粒径的颗粒占 39.65%,小于 0.002 mm 粒径的颗粒占 33.56%。土壤有机质含量为 10.38 g/kg。砾石取自渭河河滩(花岗岩风化物),砾石的平均直径、密度和风干含水率分别为 4.03 cm、2.65 g/cm³ 和 0.53%。

1.2 试验设计

土壤过 5 mm 筛并自然风干,供试土壤容重控制为 1.35 g/cm³,接近自然状态下的土壤容重,砾石分别过 30 mm 和 50 mm 筛,留取 30~50 mm 的砾石作为供试砾石,自然风干。风干土与砾石按质量比设 10:0, 9:1, 8:2, 7:3 和 6:4 共 5 个处理,试验雨强控制为 60, 90, 120 mm/h,土槽坡度控制为 15°,砾石质量分数分别为 0、10%、20%、30%、40%,试验设 2 次重复。

1.3 试验方法

根据土槽的体积、风干土的含水率(2%左右)、土壤容重及砾石密度(2.65 g/cm³)计算每一个处理所需的土壤和砾石的质量,土壤与砾石均匀混合(砾石的质量分数分别为 0、10%、20%、30%和 40%)后分层装入土槽,每一层的装土厚度为 50 mm,层与层之间打毛防止土体垂直分层,装土总厚度为 25 cm。计算公式为:

$$M_1 = \frac{V}{K/\rho_2 \times (1-K) + 1/\rho_1} \times W \times \frac{1}{5} \quad M_2 = M_2 \times \frac{1-K}{K} \quad (1)$$

式中: M_1 为每层装土的质量(kg); M_2 为每层装砾石的质量(kg); K 为表示砾石质量分数(%); ρ_1 为土壤容重(kg/cm³); ρ_2 为砾石密度(kg/cm³); W 为土壤初始含水率(%)。

降雨产流后每 1 min 收集 1 次径流,降雨结束后用称重法测定降雨过程中收集的径流量,用烘干称重法测定每 1 min 径流挟带的泥沙量。降雨历时为 60 min(产流后计时)。

2 结果与分析

2.1 降雨强度对含砾石土壤侵蚀产沙过程的影响

降雨强度对含砾石土壤侵蚀产沙过程的影响主要体现在产沙率随降雨历时的变化过程^[12]。3 种降雨强度下不同砾石质量分数的土壤产沙率的变化过程如图 1 所示。在 60 mm/h 的降雨强度下,5 种砾石质量分数的土壤在整个降雨过程中产沙率较小且变化都相对较平稳,变化幅度在 3.3~72 g/min 之间,结合降雨过程中的观察可以发现,整个降雨过程中都没有细沟发育的迹象,仅发生了雨滴击溅及薄层水流产生的片蚀。在 90 mm/h 的降雨强度下,5 种砾石质量分数的土壤产沙率在整个降雨过程中均大于 60 mm/h 的降雨强度下的产沙率,但产沙率的变化存在较大波动性,变化幅度在 21.8~458 g/min 之间,高出 60 mm/h 的降雨强度下土壤产沙率 6.5 倍,降雨初期的 0~10 min 内,由于土壤表面进行了拉毛处理,从而导致坡面上分散的颗粒被薄层水流挟带,而随着降雨历时的推进,能够挟带的分散颗粒减少导致了产沙率的降低,随后砾石质量分数为 0、10%、30%的土壤产沙率的变化都经历了一个增加并达到峰值再波动减少的过程,峰值均出现在降雨期间的 30~40 min,整个坡面侵蚀过程的变化为:细沟发育、发展到稳定,其中细沟发育是产沙率增加的主要因素。砾石质量分数为 20%的土壤产沙率变化则表现为增加的过程;砾石质量分数为 20%的土壤在降雨历时 25 min 的时候才开始有了细沟的雏形,一直到降雨结束都伴随细沟的发育;而砾石质量为 40%的土壤产沙率的变化表现为增加并稳定再增加的过程,产生这种变化的原因可能是降雨强度及高百分比含量的砾石共同作用下细沟由发育到稳定到再发育导致的。在 120 mm/h 的降雨强度下,0~10 min 内坡面就产生了能够使土壤产生细沟的临界流量,5 种砾石质量分数的土壤在降雨初期就产生了细沟的雏形,产沙率有一个明显增加的过程,而当细沟发育稳定后,产沙率又有了一个减少的过程。总的来说,细沟发育是产沙率增加的主要原因,细沟的发

育到稳定到再发育的过程伴随着产沙率的增加、减少到再增加的过程。

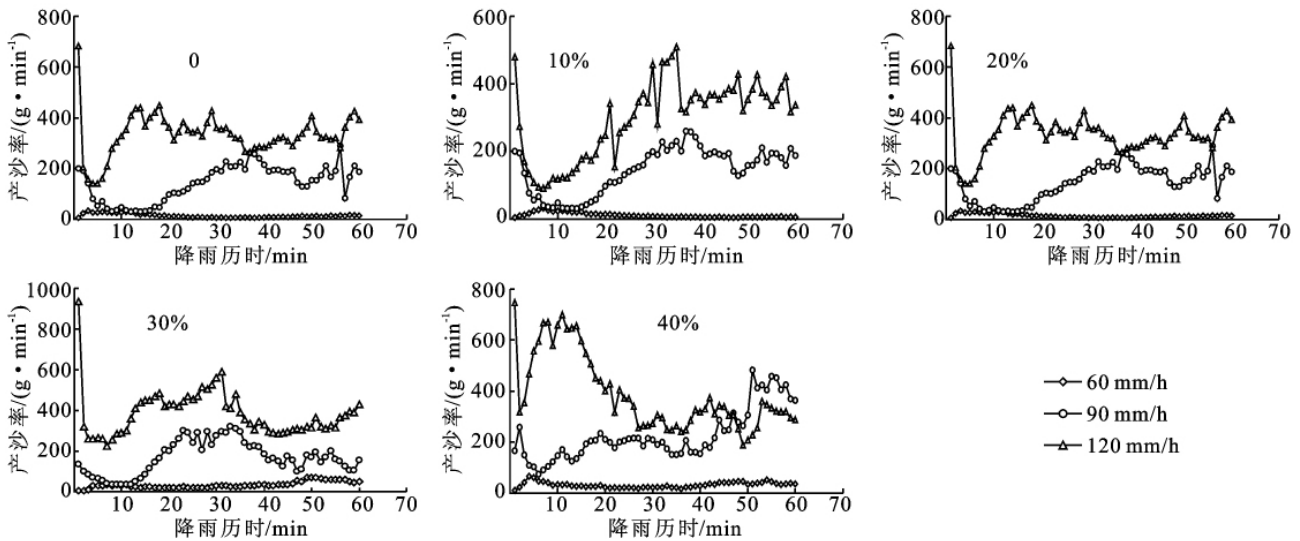


图 1 不同降雨强度下含砾石土壤产沙率的变化

2.2 降雨强度对含砾石土壤总产沙量的影响

3 种降雨强度(60,90,120 mm/h)下 5 种砾石质量分数(0, 10%,20%,30%,40%)的土壤总泥沙量的变化如图 2 所示。从图可以看出,随着降雨强度的增加,土壤的总产沙量也明显增加。与 60 mm/h 的降雨强度下土壤总产沙量比较,当降雨强度增加到 90 mm/h 和 120 mm/h 时,砾石质量分数为 0 的土壤总产沙量分别增加了 9.05,22.57 倍;砾石质量分数为 10%的总产沙量分别增加了 12.19,26.33 倍;砾石质量分数为 20%的土壤总产沙量分别增加了 3.94,15.02 倍;砾石质量分数为 30%的土壤总产沙量分别增加了 3.93,10.93 倍;砾石质量分数为 40%的土壤总产沙量分别增加了 6.09,11.15 倍。可以发现降雨强度从 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时,总产沙量的增加量与降雨强度从 60 mm/h 增加到 90 mm/h 时总产沙量的增加量相比增加了 83.1%~281.6%。

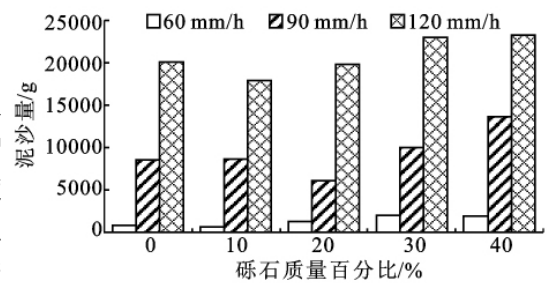


图 2 不同降雨强度下含砾石土壤总泥沙量的变化

2.3 降雨强度对土壤入渗率的影响

土壤入渗作为土壤水循环的起点,对土壤水分动态变化有重要影响,土壤入渗过程受到土壤入渗能力的影响,而土壤的入渗能力常用入渗率来表示,入渗率是指单位时间、单位面积土壤表面入渗的水量,任一时刻土壤入渗率的表达式为:

$$i = (Pt \cos \alpha - 10R/S)/t \quad (1)$$

式中: i 为坡面平均入渗率(mm/min); P 为降雨强度(mm/min); α 为地表坡度($^\circ$); t 为降雨历时(min); R 为降雨时间 t 内产生的径流量(ml); S 为坡面实际承雨面积(cm^2)。

不同降雨强度下 5 种砾石质量分数的土壤平均入渗率的变化过程如图 3 所示。从图可以看出,降雨强度对土壤的入渗率有很大影响。在整个降雨过程中,随着降雨强度的增加,平均入渗率呈减少的趋势。砾石质量分数为 0 的土壤平均入渗率在不同降雨强度下差异较明显,与 60 mm/h 的降雨强度下的入渗率相比较,90 mm/h 和 120 mm/h 的降雨强度下土壤入渗率分别减少了 27.80%和 69.08%,而 120 mm/h 的降雨强度下,土壤入渗率变化的波动性较 60 mm/h 和 90 mm/h 的降雨强度要大,其他 4 种砾石质量分数的土壤也是如此,产生这种波动性的原因可能与坡面形态的变化有关,在 120 mm/h 的降雨强度下,不仅有薄层水流产生的片蚀,同时,在降雨初期就达到了坡沟发育的临界流量,而坡沟在发育情况下,水流挟带的泥沙多于坡沟稳定期的,导致水流流速变慢,促进土壤入渗,且在整个降雨过程中,伴随着旧沟稳定和新沟发育的过程,所以导致土壤入渗率的波动性变化。从图 3 还发现,砾石质量分数为 10%,20%,30%,40%的土壤在 60 mm/h,90 mm/h,120 mm/h 的降雨强度下入渗率的差异明显小于砾石质量分数为 0 的土壤入渗率,说明砾石的存在削弱了降雨强度对土壤入渗率的影响,产生这种现象的可能原因还要进一步研究。

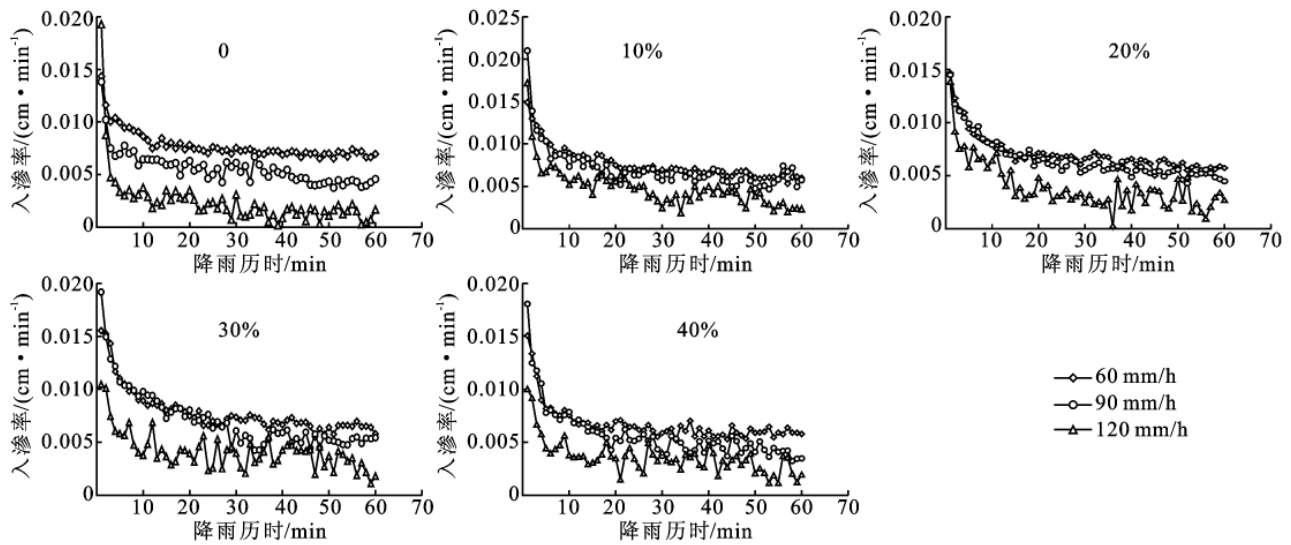


图 3 不同降雨强度下土壤入渗率随降雨历时的变化

为了更深入研究土壤入渗率随时间的变化关系,本研究用 Kostiakov 模型和 Horton 模型对实测的入渗率随降雨历时的变化过程进行拟合并进行显著性检验(拟合结果及显著性检验见表 1、表 2),其表达式如下。

$$Kostiakov \text{ 入渗模型: } i(t) = at^{-b} \quad (2)$$

式中: a, b 为经验常数。

$$Horton \text{ 模型: } i(t) = m + (n - m)e^{-ct} \quad (3)$$

式中: m, n 分别为稳定入渗率和初始入渗率; c 为经验常数。

检验结果均达到极显著水平 ($p < 0.01$), 也就是说 Kostiakov 模型和 Horton 模型均能够很好地模拟 3 种降雨强度下土壤入渗率的变化过程。在 60 mm/h 的降雨强度下, Horton 模型拟合结果较 Kostiakov 模型的更好, 而在

90 mm/h 和 120 mm/h 的降雨强度下, Kostiakov 模型拟合结果较 Horton 模型的更好。

通过用 Horton 模型对实测数据模拟后发现, 随着降雨强度的增加, 土壤的稳渗速率呈减小的趋势, 而初始入渗率是稳渗速率的 10 倍以上。

表 1 不同降雨强度下含砾石土壤入渗过程 Kostiakov 拟合结果

雨强/ (mm·h ⁻¹)	砾石质量 分数/%	参数		R ²	样本数	相关 系数	Sig.
		a	b				
60	0	0.013	0.168	0.917	60	0.958	0.000
	10	0.009	0.099	0.825	60	0.908	0.000
	20	0.014	0.228	0.934	60	0.966	0.000
	30	0.016	0.246	0.936	60	0.967	0.000
	40	0.014	0.235	0.855	60	0.925	0.000
90	0	0.012	0.250	0.830	60	0.911	0.000
	10	0.018	0.307	0.855	60	0.926	0.000
	20	0.015	0.269	0.962	60	0.981	0.000
	30	0.019	0.335	0.946	60	0.973	0.000
	40	0.017	0.365	0.934	60	0.967	0.000
120	0	0.017	0.738	0.867	60	0.935	0.000
	10	0.015	0.387	0.838	60	0.916	0.000
	20	0.013	0.420	0.803	60	0.896	0.000
	30	0.010	0.308	0.639	60	0.798	0.000
	40	0.010	0.332	0.690	60	0.831	0.000

表 2 不同降雨强度下含砾石土壤入渗过程 Horton 拟合结果

雨强/ (mm·h ⁻¹)	砾石质量 分数/%	稳渗速率/ (cm·min ⁻¹)	初始入渗速率/ (cm·min ⁻¹)	c	R ²	样本数	相关 系数	Sig.
60	10	0.006	0.014	0.110	0.935	60	0.967	0.00
	20	0.006	0.015	0.172	0.923	60	0.961	0.000
	30	0.007	0.017	0.142	0.942	60	0.971	0.000
	40	0.006	0.018	0.271	0.926	60	0.962	0.000
	90	0	0.005	0.013	0.183	0.727	60	0.852
90	10	0.006	0.023	0.300	0.860	60	0.927	0.000
	20	0.005	0.014	0.111	0.945	60	0.972	0.000
	30	0.005	0.017	0.099	0.913	60	0.956	0.000
	40	0.005	0.018	0.190	0.892	60	0.945	0.000
	120	0	0.002	0.040	0.801	0.882	60	0.939
120	10	0.004	0.017	0.232	0.733	60	0.856	0.000
	20	0.003	0.012	0.129	0.784	60	0.885	0.000
	30	0.004	0.012	0.218	0.636	60	0.797	0.000
	40	0.003	0.012	0.272	0.674	60	0.821	0.000

3 结论

(1)随着降雨强度的增加,土壤产沙率有增加的趋势,而在 60 mm/h 的降雨强度下,由于仅发生了雨滴击溅及薄层水流产生的片蚀,所以导致土壤产沙率较小且随降雨历时的变化相对平稳;而在 90 mm/h 和 120 mm/h 的降雨强度下,由于坡面细沟的产生导致土壤产沙率的波动性,所以与 90 mm/h 的降雨强度相比,120 mm/h 的降雨强度下细沟产生的时间提前了 5~20 min。

(2)降雨强度的增加导致土壤总产沙量也显著增加,而降雨强度从 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时,总产沙量的增加量是降雨强度从 60 mm/h 增加到 90 mm/h 时总产沙量的增加量的 0.83~2.82 倍。

(3)随着降雨强度的增加,土壤的入渗率有下降的趋势,Kostiakov 模型和 Horton 模型均可以很好地模拟 3 种降雨强度下含砾石土壤的入渗过程,而在 60 mm/h 的降雨强度下,Horton 模型优于 Kostiakov 模型,在 90 mm/h 和 120 mm/h 的降雨强度下,Kostiakov 模型优于 Horton 模型。通过用 Horton 模型对实测数据模拟后发现,随着降雨强度的增加,土壤的稳渗速率呈减小的趋势,而初始入渗率是稳渗速率的 10 倍以上。

参考文献:

- [1] 唐克丽,侯庆春,王斌科,等.黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向[J].水土保持研究,1993,18(2): 2-15.
- [2] 贾恒义,雍绍萍,王富乾.神木试区的土壤资源[J].水土保持研究,1993,18(2):36-46.
- [3] 吴冰,邵明安,毛天旭,等.模拟降雨下坡度对含砾石土壤径流和产沙过程的影响[J].水土保持研究,2010,17(5):54-58.
- [4] 吴冰,朱元骏,邵明安.含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究[J].中国水土保持科学,2011,9(1):99-103.
- [5] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils; Significance and processes[J]. Catena, 1994, 23: 1-28.
- [6] Brakensiek D L. Soil containing rock fragments; Effects on infiltration[J]. Catena, 1994, 23: 99-110.
- [7] Poesen J, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales; A review[J]. Catena, 1994, 23: 141-166.
- [8] Poesen J, Luna E D, Franca A, Nachtergaele J. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content[J]. Catena, 1999, 36: 315-329.
- [9] 王慧芳,邵明安.含碎石土壤水分入渗试验研究[J].水科学进展,2006,17(5):604-609.
- [10] 周蓓蓓,邵明安.不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J].土壤学报,2007,44(5):801-807.
- [11] 朱元骏,邵明安.不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J].农业工程学报,2006,22(2):64-67.
- [12] 耿晓东,郑粉莉,刘力,等.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀和产沙的影响[J].泥沙研究,2010,45(6):48-53.

上接第 71 页

- [4] 张民,史衍玺,杨守祥,等.控释和缓释肥的研究现状与进展[J].化肥工业,2001,28(5):27-30.
- [5] 樊小林,刘芳,廖照源,等.我国控释肥料研究的现状和展望[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):413-473.
- [6] 许秀成,李荫萍,王好斌.包裹型缓释/控制释放肥料专题报告[J].磷肥与复肥,2001,16(4):4-8.
- [7] 赵炳梓,张佳宝.黄淮海平原集约化种植条件下的土壤剖面硝态氮变化[J].土壤学报,2007,39(5):760-765.
- [8] 熊淑萍,姬兴杰,赵巧梅,等.不同肥料类型对土壤硝态氮时空变异的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):171-176.
- [9] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000:192-198.
- [10] 冯波,王法宏,刘延忠,等.施氮水平对不同栽培模式小麦旗叶衰老及产量的影响[J].中国农学通报,2010,26(8):189-193.
- [11] 赵斌,董树亭,王空军,等.控释肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响[J].应用生态学报,2009,20(11):2178-2184.
- [12] 宗晓庆,张民,张庆富,等.硫包膜尿素对土壤性质和夏玉米生长的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):227-231.

上接第 75 页

- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,1999.
- [12] 罗歆,代数,何丙辉,等.缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究[J].水土保持学报,2011,25(1):64-69.
- [13] Jeffries P, Gianinazzi S, Perotto S, et al. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility[J]. Biology and Fertility of Soils, 2003, 37: 1-16.
- [14] 刘聪,朱教君,吴祥云,等.辽东山区次生林不同大小林窗土壤养分特征[J].东北林业大学学报,2011,39(1):79-81.
- [15] Ashagrie Y, Zech W, Guggenberger G. Transformation of a *Podocarpus falcatus* dominated natural forest into a monoculture *Eucalyptus globulus* plantation at Munesa, Ethiopia; Soil organic C, N and S dynamics in primary particle and aggregate size fractions[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 106: 89-98.