

模拟降雨条件下施硝酸铵对黄土坡面 氮素迁移的影响^{*}

张亚丽^{1,2},李怀恩¹,张兴昌^{2,3},肖 波²

(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048;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 杨凌 712100;3 西北农林科技大学 水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

[摘 要] 利用室内模拟降雨试验,研究了在坡面施入硝酸铵对土壤矿质氮素随地表径流流失和入渗的影响,初步探讨了降雨-地表径流-土壤矿质氮素的有效作用深度(Effective Depth of Interaction, EDI),分别用反推法和拐点法确定了不施肥试验和施肥试验时的土壤矿质氮素 EDI。结果表明: 与不施肥相比,施肥增加了土壤矿质氮素的地表流失量,施 25、50 和 100 g NH₄NO₃ 处理矿质氮分别多流失了 55.22、73.32 和 85.50 mg/m²; 施肥使土壤肥料的入渗量增加,但对肥料的入渗深度和土壤矿质氮素 EDI 影响很小; 同一坡面不同坡位 NO₃⁻-N 的 EDI 值不同,表现为坡中下部较大,坡顶部和坡底部均较小。避免在雨季大量表施速效氮肥,是减少矿质氮流失的关键。

[关键词] 模拟降雨;黄土坡面;氮素迁移;有效作用深度

[中图分类号] S157.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)05-0154-05

Soil nitrogen transport affected by applying NH₄NO₃ on the loess slope

ZHANG Ya-li^{1,2}, LI Huai-en¹, ZHANG Xing-chang^{2,3}, XIAO Bo²

(1 Northwest Water Resources and Environment Ecology Key Laboratory of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract : According to the results of simulated runoff experiments, the soil nitrogen transport affected by applying NH₄NO₃ on the loess slope are studied. Meanwhile, the effective depth of interaction (EDI) of runoff with soil mineral nitrogen is analyzed, and the methods to confirm EDI of both NH₄NO₃-applied experiments and no-NH₄NO₃-applied ones are recommended. The results are as follows. There is no evident influence of the same type of fertilization on soil erosion. But it has a great impact on the amount of soil mineral nitrogen loss in runoff and leaching. Compared with that of no-NH₄NO₃-applied, the loss amount of mineral nitrogen by surface runoff and sediment in the NH₄NO₃-applied experiments with 25, 50 and 100 g NH₄NO₃ increases by 55.22, 73.32 and 85.50 mg/m², respectively. Meanwhile, the infiltration of nitrate is augmented by NH₄NO₃-applied. The same type of fertilization can rarely influence the depth of leaching and the EDI of soil NO₃⁻-N. The EDI of soil NO₃⁻ is deeper than that of soil NH₄⁺. There are different spatial distributions of the EDI along the slope land, deeper in the middle and lower parts, while shallower

^{*} [收稿日期] 2006-09-11

[基金项目] 国家自然科学基金项目(90610030);陕西省教育厅省级重点实验室重点科研计划项目(05J S35);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501-142);西安理工大学优秀博士论文基金项目(106-210623)

[作者简介] 张亚丽(1976-),女,河南南阳人,在读博士,主要从事农业非点源污染机理研究。E-mail:skyali@163.com

in the upper and lower parts. To reduce the loss amount of soil mineral nitrogen by runoff and sediment, largely applying NH_4NO_3 in rainy season should be avoided.

Key words: artificial rainfall; loess slope land; soil nitrogen release and transport; effective interaction depth

兼顾氮肥施用的农业效益和环境效益,是氮肥合理施用的基本指导思想。水蚀条件下,坡地养分流失具体表现为两种形式:其一是在降雨条件下,当土壤入渗能力小于雨强时,产生地表径流,可溶性物质随地表径流迁移;其二是土壤内部的可溶性物质随入渗水分沿垂直方向迁移^[1]。降雨和径流是土壤养分迁移的主要动力,土壤是水土相互作用的界面和养分迁移的“母体”^[2]。由于土壤养分流失与水土流失过程密切相关,人们通常从土壤侵蚀角度研究养分流失,所建立的养分流失模型大多以土壤侵蚀模型为基础^[3-5]。已有研究表明,水蚀条件下土壤养分的流失过程实质是表层土壤养分与降雨、地表径流的作用过程,是土壤养分在土壤、径流和泥沙等不同载体中的质量传递^[2]。在一场降雨中,只有土壤表层一定深度以上的养分才能够参与径流损失,而此深度以下的土壤养分极少发生流失,该深度被称为有效作用深度(Effective Depth of Interaction, EDI)^[6-7](或有效混合深度、等效迁移深度等^[1])。EDI反映了参与径流迁移溶质的存在范围及其参与程度,是模拟土壤溶质迁移过程的一个重要参数,对农业非点源污染物机理研究和污染负荷估算也具有重要意义。虽然中外学者曾对其进行了理论推导并建立了一些模型^[5-7],但这些模型多为经验模型,缺乏足够的试验实证而未能广泛应用。

本文试图通过模拟降雨试验,研究坡面表层施入 NH_4NO_3 对黄土区土壤矿质氮素流失、入渗和 EDI 的影响,分析同一坡面不同坡位的 EDI,初步探讨降雨、地表径流与土壤溶质作用的空间分异性,旨在揭示土壤矿质氮素和降雨、径流作用的机理,为研究坡面土壤养分流失和农业非点源污染提供科学依据。

1 研究方法

1.1 供试材料

模拟降雨试验在陕西杨凌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模拟降雨大厅进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统,喷头高度为 16 m,雨滴降落终速可达到自然雨滴降落速度的 98% 以上^[8]。土槽为 1 个长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = 3.8 m $\times$ 0.3 m $\times$ 0.6 m 的坡度可调式钢

槽,下端设集流装置,可定时采集径流样。槽底均匀打孔,用于模拟天然透水坡面。所用土壤均为黄绵土,采自陕西省安塞县,质地为粉质壤土。

1.2 试验设计

将供试土壤过 5 mm 筛,装土时控制含水量为 10% 左右,土壤容重维持在 $(1.25 \pm 0.05) \text{ g/cm}^3$ 。雨强定为 1.00 mm/min(以实际率定结果为准),降雨时间为 90 min,坡度均为 15°。模拟试验共分 4 次完成,分别于降雨试验前 1 h 施 0, 25, 50 和 100 g NH_4NO_3 (分别相当于 0, 76.8, 153.5 和 307.1 kg/hm² 纯 N)。施肥时将一定量 NH_4NO_3 溶于 1 L 清水中,用喷壶均匀喷于 9 kg 风干土上,充分拌匀后铺在土槽的最上面,土层高度为 0.6 cm(维持土壤含水量为 10%、容重为 1.25 g/cm³),砸实并保持土面平整。降雨前采集原始土壤以备测土壤矿质氮素含量。降雨结束后,立即在槽内沿坡面 5 个等分点处垂直向下挖剖面,每 1 cm 向下取土至土层水分湿润锋处。

1.3 样品分析

降雨过程中采集雨水样以备测定雨水养分含量,同时分不同径流时段采集径流样,测定各泥水样的总体积,取部分上层清液过滤后测定径流中矿质氮含量;剩余泥水样经过澄清、倾水后将泥沙风干称重,测定泥沙中的矿质氮含量。土壤和泥沙中矿质氮用 2 mol/L KCl 溶液浸提(土水体积比为 1:5)。土壤水分含量用烘干法测定,土样和水样中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 用紫外分光光度计测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 用连续流动分析仪测定。

2 结果与分析

2.1 施肥对地表土壤矿质氮流失的影响

土壤氮素在水蚀条件下随径流迁移表现为三种方式:土壤液相中的可溶性氮素在径流中的溶解;土壤颗粒吸附的矿质氮在径流中的解吸;土壤颗粒中的氮素随产流在坡面的传递和被水体携带。降雨动能和水流重力是这 3 种作用过程的主要动力^[2]。在坡面表层施速效氮肥不影响降雨动能和地表径流的侵蚀力,因而对水土流失量几乎无影响,但对养分流失却有显著影响。降雨因素和下垫面条件

相同的情况下,与不施肥相比,施肥增加了土壤矿质氮素随地表径流和泥沙流失的流失量,且施肥量越大,流失量越大。由表 1 可知,施 25,50 和 100 g NH_4NO_3 ,径流中的矿质氮比不施肥处理分别多流失了 54.27,71.37 和 83.49 mg/m^2 ,泥沙中的矿质

氮则分别多流失了 1.25,1.83 和 2.00 mg/m^2 。与供试土壤相比,泥沙中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量都有所增加,尤其是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量增加了 4~7 倍。土壤矿质氮素流失以径流流失为主,泥沙中的矿质氮流失量仅占径流流失量的 1%~2%。

表 1 施 NH_4NO_3 对水土流失量和矿质氮流失量的影响

Table 1 Loss amount of soil and water ,and mineral nitrogen affected by applying NH_4NO_3

NH ₄ NO ₃ 施加量/ g NH ₄ NO ₃ amount	雨 强/ (mm · min ⁻¹) Rain intensity	径流量/ mL Runoff	径流矿质氮流失量/ (mg · m ⁻²) Loss amount of mineral nitrogen by runoff			泥沙流 失量/ g Sediment	泥沙矿质氮流失量/ (mg · m ⁻²) Loss amount of mineral nitrogen by sediment		
			NO ₃ ⁻ - N	NH ₄ ⁺ - N	总流失量 Total amount		NO ₃ ⁻ - N	NH ₄ ⁺ - N	总流失量 Total amount
0	1.022	22 234	157.55	7.74	165.29	49.22	1.65	0.58	2.23
25	1.097	31 383	204.09	15.47	219.56	66.30	2.37	1.11	3.48
50	1.006	29 200	217.45	18.11	236.66	74.92	2.83	1.23	4.06
100	1.021	30 965	230.23	18.55	248.78	85.15	3.24	0.99	4.23

2.2 施肥对土壤矿质氮素入渗的影响

土壤养分的入渗不仅取决于土壤水分运动、土壤理化性质和地形地貌等条件,养分浓度梯度也是一个重要的影响因素。在土壤表层施入速效氮肥,增加了坡面养分浓度梯度,明显促进了土壤肥料的入渗量,但对入渗深度影响不大。由图 1 和图 2 可知,虽然 4 次降雨试验的施肥量不同,但是降雨结束后矿质氮素在土壤剖面的分布曲线轨迹基本一致。土壤表层的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量最低,仅为原始土壤的 47%~81%,之后逐渐增加并在土层某一深处达到峰值后又开始降低;土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋溶与水分入渗并不完全同步,即浓度峰值并不位于湿润锋处,降

雨结束时各处理的湿润峰位于 26~28 cm 处,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均在土层的 15~19 cm 处达到峰值。与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 不同,土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 主要在土壤表层大量富集,几乎不发生淋溶损失;降雨结束后土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 峰值位于 2 cm 处,而 5 cm 以下深处的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量与原始土壤相比增幅很小。施肥量越大,坡面养分累计入渗量越大,在同一土层深度处的养分含量越大。施入 0,25,50 和 100 g NH_4NO_3 时各处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度峰值分别为 2.47,14.12,16.15 和 16.85 mg/kg ; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度峰值分别为 0.91,18.59,22.01 和 31.62 mg/kg 。

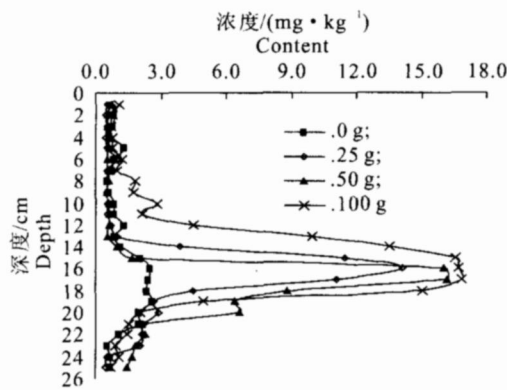


图 1 降雨结束时不同施 N 量对土壤剖面 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布的影响

Fig. 1 Nitrate distribution on soil profile affected by fertilizer amount when the runoff ceased

2.3 施肥对土壤矿质氮素 EDI 的影响

2.3.1 土壤矿质氮素 EDI 的确定方法 在一场降雨过程中,径流冲刷使坡地表层土壤流失,其下层土壤失去了保护层并与雨水形成水土混合体,使其土

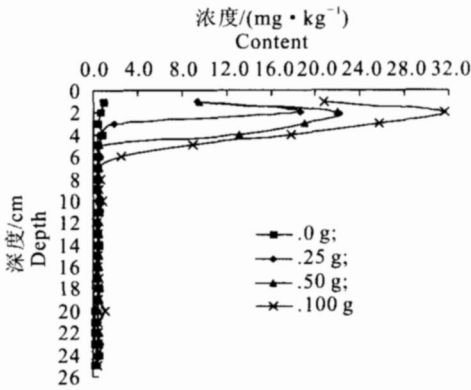


图 2 降雨结束时不同施 N 量对土壤剖面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分布的影响

Fig. 2 Ammonium distribution on soil profile affected by fertilizer amount when the runoff ceased

壤溶质更易在雨滴的击溅作用和径流的冲刷解吸下随地表径流流失。因此,地表流失的土壤溶质除了存在于易剥蚀的表层土壤中的外,还包括 EDI 内的土壤溶质。本试验通过分层取土样,从分析径流与

土壤矿质氮素的作用机理着手,将坡面养分迁移动力学和土壤溶质运移理论结合起来,对不施肥试验和施肥试验矿质氮素的 EDI 分别进行了界定。具体界定方法如下:

(1) 在未施肥试验中,根据质量平衡原理,通过计算土壤矿质氮素流失量与产流前后土壤剖面养分浓度变化量反推 EDI,即将与土壤矿质氮素随径流和泥沙流失量(对非纯水模拟试验应扣除雨水养分含量)最为接近的产流前后土壤剖面养分变化量累加值所处的深度作为 EDI(简称反推法)。显然,这里未考虑降雨和径流过程中表层养分向土体内的入渗作用。这主要是由于表层养分浓度梯度小,入渗量甚小,可忽略不计。

(2) 施肥试验中,从分析降雨、径流与土壤矿质氮素作用机理及土壤矿质氮素物化性状入手,将降雨结束后土壤矿质氮素浓度曲线第一个拐点所处的深度作为 EDI(简称拐点法),具体分析详见文献[9]。

2.3.2 EDI 的确定 对于不施肥试验,地表径流和侵蚀泥沙中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的总流失量为 159.20 mg/m^2 (表 1),扣除模拟降雨雨水和原始土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的背景含量 156.29 mg/m^2 ,则可以计算出面积为 1.14 m^2 、坡度为 15 的黄土坡地 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的净流失量为 3.3 mg 。分别计算降雨后 5 个采样剖面由上至下各土层养分含量与降雨前养分的累计变化量,与地表流失量 3.3 mg 最接近的分别是 $3.24, 3.35, 3.44, 3.30$ 和 3.22 mg 。地表产流结束后土壤中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量较降雨前反而增加了 0.3 mg/m^2 ,径流与泥沙中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 之和也小于雨水中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$

含量。这反映了在坡面表层土壤与降雨、地表径流的作用中,土壤对降雨雨水中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 具有一定的过滤作用,与野外小流域试验结论相同^[10],但具体过滤机理和影响因素等仍需深入研究。

由表 2 可知,不同施肥量下土壤矿质氮素的 EDI 差别不大。尤其是与实测降雨强度极为接近的不施肥和施 $100 \text{ g NH}_4\text{NO}_3$ 处理(表 1)中,用两种方法所确定的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的 EDI 也非常接近。只是在 4 个施肥处理中,施 $25 \text{ g NH}_4\text{NO}_3$ 时 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的 EDI 值较大,但可能是实测降雨强度较大所致。因此,可以认为同种方式施肥对矿质氮素 EDI 影响不大,该结论与野外小流域¹⁵ N 示踪试验结果基本一致^[10]。其原因有二:一是降雨因素和下垫面等条件一致,坡面径流的流量与流速相同,则施肥多少不影响降雨、地表径流与土壤溶质的作用强度;二是施肥导致土壤中肥料浓度梯度和入渗量不同,但对地表径流量和汇流速度并无影响。本研究结果也反映了用拐点法和反推法确定 EDI 均有一定的理论依据,二者所得结论是一致的。

比较各处理坡面不同位置矿质氮素 EDI 的确定结果(表 2),基本表现出坡中下部较大、坡顶较小的趋势。这是由于降雨过程中,坡面径流侵蚀力和养分的入渗在不同坡位间存在着时空差异,地表径流沿坡面向下的流量和流速逐渐增大,对坡面中下部土壤搬运冲刷作用较强,与土壤溶质的相互作用强度较大,导致中下部土壤矿质氮素的 EDI 值较大。另外,不同溶质与降雨、地表径流作用结果不同,土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的 EDI 明显大于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,两者之差为 $4 \sim 10 \text{ cm}$ 。

表 2 施 NH_4NO_3 对坡面土壤矿质氮素 EDI 的影响

Table 2 Effects on EDI of soil mineral nitrogen on the loess slope by applying fertilizer NH_4NO_3 cm								
距坡顶距离/cm Distance from the slope top	NH_4NO_3 施加量/g NH_4NO_3 amount							
	0		25		50		100	
	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$
64	8.5	-	10.5	2.5	10.5	3.5	8.5	2.5
127	9.5	-	12.5	3.5	10.5	3.5	8.5	5.5
190	8.5	-	12.5	2.5	12.5	3.5	8.5	5.5
253	9.5	-	14.5	3.5	11.5	4.5	9.5	4.5
316	8.5	-	14.5	3.5	10.5	3.5	9.5	3.5
平均值 Average value	8.9	-	12.9	3.1	11.1	3.7	8.9	4.3

3 结 论

在减少氮素对水环境污染和提高农业产量的双重要求下,有必要深入研究氮肥施用对土壤矿质氮

素迁移的影响。本研究表明,同一种施肥方式下,施肥量不同并不影响降雨动能和坡面径流的侵蚀力,因而对土壤矿质氮素入渗深度和 EDI 的影响很小。土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的 EDI 在坡面上存在空间分异性,表

现为坡面中下部较大、坡顶部较小。在坡面表层,施硝酸铵,对水土流失量影响很小,但可使土壤矿质氮素的垂向入渗量和地表流失量增加,且施氮量越大,肥料的迁移量越大。因此,应该避免在雨季大量表施速效氮肥,建议采取适当的保护性耕作措施和截流设施,减少坡地土壤肥料的大量流失。

[参考文献]

- [1] Wang Q J, Robert H, Shao M. Effective kinetic energy influence on soil potassium transport into runoff[J]. Soil Science, 2002, 167(6): 369-376.
- [2] 张兴昌. 坡地土壤氮素与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 地理科学进展, 2000, 19(2): 128-133.
- [3] Bouraoui F, Dillaha T A. Answers 2000: Nonpoint-source nutrient planning model [J]. J. Environ. Engng. ASCE, 2000, 122(11): 1045-1055.
- [4] Lowell E, Mark B D, Karen M A. Nitrogen fertilizer and herbicide transport from tile drained fields [J]. J. Environ. Qual, 2000, 29: 232-240.
- [5] Waddell J T, Gupta S C, Moncrief J F. Irrigation and nitrogen management impacts on nitrate leaching under potato [J]. J. Environ., 2000, 29: 251-261.
- [6] Ahuja L R, Sharpley A N. The depth of rainfall-runoff-soil interactions as determined by ^{32}P [J]. Water Resour. Res., 1981, 17: 967-974.
- [7] Ahuja L R. The extent and nature of rainfall-soil interaction in the release of soluble chemicals to runoff [J]. Environ. Qual, 1983, 12: 34-40.
- [8] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 27-30.
- [9] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面土壤矿质氮素径流流失影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 55-58.
- [10] Zhang X C, Shao M. Effects of vegetation coverage and management practice on soil nitrogen loss by erosion in a hilly region of the loess plateau in China [J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(10): 1195-1203.
- [9] 庄大方, 邓祥征, 战金艳, 等. 北京市土地利用变化的空间分布特征[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 667-678.
- [10] 顾朝林. 北京市土地利用/覆被变化机制研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 307-312.
- [11] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 151-160.
- [12] 杨桂山. 长江三角洲近 50 年耕地数量变化的过程与驱动机制研究[J]. 自然资源学报, 2002, 16(2): 121-127.
- [13] 康慕谊, 江源, 石瑞香. NECT 样带 1984~1996 土地利用变化分析[J]. 地理科学, 2002, 20(2): 115-120.
- [14] 张永民, 赵士洞. 科尔沁沙地及其周围地区土地利用的时空动态变化研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 429-435.
- [15] 黄方, 刘湘南, 张养贞, 等. 基于遥感和 GIS 的松嫩沙地土地利用/土地覆被时空格局研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 136-141.
- [16] Lambin E F. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions [J]. Progress in Physical Geography, 1997, 21(3): 375-393.
- [17] 王根绪, 沈永平, 程国栋. 黄河源区生态环境变化与成因分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 200-205.
- [18] 摆万奇, 张镜铨, 谢高地, 等. 黄河源区玛多县草地退化成因分析[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 823-826.
- [19] 沙占江, 马海州, 陈克龙, 等. 基于 GIS 和 RS 的黄河源区土地沙漠化探讨[J]. 盐湖研究, 2001, 9(1): 67-70.
- [20] 沈渭寿, 吴焕忠, 蒋建国, 等. 黄河源区生态破坏现状及保护对策[J]. 农村生态环境, 2000, 16(1): 1-4, 16.
- [21] Jerry M. 《中国西部生态系统综合评估》评述二 [J]. 地理学报, 2006, 61(1): 110.
- [22] 冯永忠. 区域生态环境演变的主导因素分离与效应强度分析[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学农学院, 2006.

(上接第 153 页)