

## 黄土高原侵蚀产沙的地貌临界

陆中臣<sup>1</sup>, 陈劭锋<sup>2</sup>, 陈浩<sup>3</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;

2. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 从地貌学的角度, 较为深入地研究了黄土高原侵蚀产沙的几个临界问题: 坡地系统的产沙临界、河道系统的产沙临界、以及地貌发育阶段的临界问题等, 对地貌临界在黄土高原侵蚀产沙中应用作了进一步的探讨。结果表明, 在黄土高原地貌发育阶段的不同临界范围内, 其产沙量是不同的, 因此, 研究地貌临界不仅蕴涵着比较深刻的哲学和科学理论意义, 而且具有一定的实践意义。

**关键词:** 黄土高原; 侵蚀产沙; 地貌临界

中图分类号: S 157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)01-0001-03

## The Geomorphic Thresholds of Erosional Sediment in the Loess Plateau

LU Zhong-chen<sup>1</sup>, CHEN Shao-feng<sup>2</sup>, CHEN Hao<sup>3</sup>

(1. *Research Center for Eco-environment, CA S, Beijing 100085, China;*

2. *Institute of Policy and Management Science, CA S, Beijing 100080, China;*

3. *Institute of Geography Science and Resource, CA S, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** From the geomorphologic perspective, a further study on several threshold phenomena of erosional sediment in the Loess Plateau was made including the threshold phenomena in the slope system, channel system and geomorphic development stage and so on, which has a certain theoretical and practical significance.

**Key words:** Loess Plateau; erosional sediment; geomorphic threshold

黄土高原是全国水土流失最严重的地区之一, 由于土壤的侵蚀, 产生的泥沙体现了搬运、堆积过程, 在诸过程中塑造的地貌现象, 如坡地系统、沟谷和河道系统等, 在内外营力共同作用下达到一定的限度, 对产沙来说其地貌现象将会出现巨大的质的变化。我们将其称之为黄土高原侵蚀产沙的地貌临界。

自上世纪 70 年代 Schumm 首次将临界规律引入到地貌系统的研究以来, 经过一些学者的不断努力, 逐步形成了所谓“地貌临界论”。由于该理论从崭新的角度审视地貌现象由量变到质变或者说由渐变到突变的转化规律, 使对地貌演化过程中发生的明显变异现象进行合理的解释成为可能, 因此受到地质地貌界的普遍关注。研究地貌临界不仅蕴涵着比较深刻的哲学和科学理论意义, 而且具有一定的实践意义, 如通过地貌临界和运用地貌过程中的临界阈值, 对地貌发育阶段进行量化, 洞察地貌要素之间相互作用的内在机理、强度和动态转化的临界条件, 进而预测地貌现象的发展趋势, 为国土整治服务。本文试图从地貌学角度, 研究黄土高原侵蚀产沙中的一些与地貌有关的临界问题, 以辩证临界条件发生发展的规律和应用, 作进一步的探讨。

### 1 黄土高原坡地系统产沙的地貌临界

坡地系统包括坡面和沟谷(坡地和河道系统的过渡带)两部分, 在侵蚀产沙中都存在着坡度或坡降的临界。它们是径流和侵蚀产沙的重要来源地, 因此长期以来是土壤、地貌

和水文学家研究的主要领域。研究坡地系统演化过程有重要意义, 即对农业生产和水土保持规划可提供科学依据。

(1) 坡面侵蚀产沙的临界: 有关坡面坡度临界的研究表明: 坡面既受片流冲刷, 又受雨滴击溅侵蚀, 从人工降雨和坡面侵蚀的研究发现<sup>[1,2]</sup>, 在小于 8% 的坡地上, 坡面冲刷量仅占总流失量的 10% 左右; 而当坡度增到 16% 时, 坡面冲刷量猛增到 60%, 似乎存在一个临界坡度, 处于该值以下的缓坡, 雨滴击溅是表土流失的一个重要原因; 而在高于该值的坡地上, 径流冲刷起着主导作用。若片流冲刷能力以单位坡面之水力切力表示, 水力切力既与坡面坡度有关, 又与土层厚度有关, 分析结果得坡度函数具有的临界坡度为 45°; 因为 45° 的坡面上的有效切应力最大。在该临界值以下, 片流冲刷能力随坡度的增加而加大, 超过临界值以后, 冲刷能力随坡度增加而递减。如将霍顿的坡度函数对坡度求极大值, 就可得到反映坡面冲刷能力的临界为 57°。美国爱达荷州特伊河流域的实测资料可以看出, 坡地受侵蚀的面积百分数随坡度而异, 其临界坡度约 45% (40.5°)<sup>[1][3]</sup>。黄土高原坡度对侵蚀强度的影响, 根据甘枝茂绘制的黄土高原各种侵蚀方式分布的坡度范围图修改后(图 1)<sup>[4]</sup>, 流水侵蚀主要分布在 6~60 区间, 而且在 30 左右侵蚀达到高峰。这是因为在平缓的地区, 有利于水分入渗, 不易形成地表径流。随着坡度的增大, 入渗减少, 地表径流增大, 侵蚀随之增加。但随着坡度的增大, 接受降雨的面积却在减少。因此降雨产生的地表流水的侵蚀并不是随着坡度增大

① 收稿日期: 2005-02-27

基金项目: 国家基金委和黄河水利委员会联合资助重点项目(50239080)

作者简介: 陆中臣(1935-), 男, 研究员, 主要从事流域地貌系统, 河床演变、环境地学等领域的研究。

而一直增强。据测验坡度大于 30° 随着坡度的增大, 降雨产生的地表径流的侵蚀随之减小。

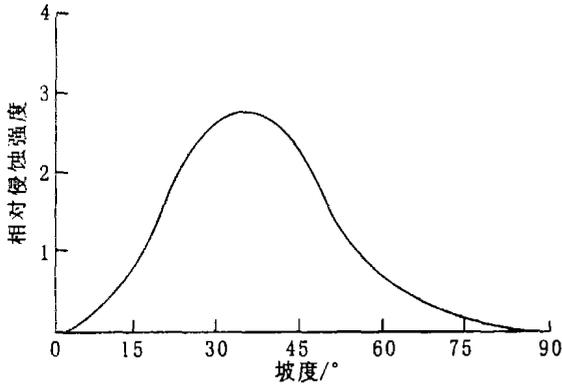


图 1 水力侵蚀方式分布的坡度(引甘枝茂图删改)

(2) 沟谷谷底临界坡度的侵蚀产沙响应: 在一个地质、土地利用和气候均一的地区, 不连续冲沟的发育中, 似乎存在一个沟谷谷底的临界坡降, 超过这一比降, 谷底就不稳定, 即产生谷中谷的现象。我们在宁夏高原东部山区考查时, 发现不连续冲沟, 即谷中谷的现象普遍存在, 它对农田和交通的危害很大, 以王洼区为例, 大支毛沟总共有 1 296 条, 沟头不稳定的有 1 286 条, 据调查, 沟头平均每年延伸最大的为 17 m, 宽 25 ~ 30 m, 深数米, 每年由于沟头的延伸要破坏耕地 322 ~ 385.6 hm<sup>2</sup>, 占川台壕掌地的 4.4% ~ 5.3%。由于沟头向上延伸, 迫使公路绕行, 如北洼大队斩蛟头和姬阳洼间的北洼沟头, 使公路延伸了 300 m, 吉家庄的支沟已把涝沟川破坏了 1/3。由于沟头前进, 每年可产沙 965 万 m<sup>3</sup>。这种不连续冲沟的产生与谷底比降有关, 在一些沟谷里冲沟侵蚀开始时, 趋向集中在谷底较陡的河段上, 对固原东部山区, 在给定的地质、土地利用和气候条件下, 即存在一个临界的沟谷比降(地貌临界比降), 超过了该值谷底就不稳定了, 于是产生了一系列谷中谷的冲沟现象。

为此, 我们在这个地区选择了一些典型的具有不连续冲沟和没有冲沟的河谷, 计算了多年平均径流量和沟谷比降, 然后点绘在图上则成反比关系(图 2), 由图可以看出, 多年平均水量大的流域具有较平缓的沟谷比降。发育有沟壑的不稳定谷底的点据集中在曲线之上, 而无冲沟现象的稳定谷底的点据集中在曲线之下。于是只要给出一定大小的流域, 计算出不同大小流域径流量, 就可确定一个临界的沟谷比降值, 沟谷比降在该值之下时, 该谷底是稳定的, 否则为不稳定的。这样一来, 利用图 2 就可确定固原东部山区河谷不稳定和发育冲沟的临界比降, 这对山区的水土保持和土地管理是非常重要的, 因为如果沟谷的原始不稳定比降确定的话, 那么就可采用正确的治理措施, 从而人为地稳定这些临界河段, 达到治理的目的。

## 2 河道系统产沙的地貌临界

黄土高原河道系统的地貌临界, 指的是支流河道的比降存在着临界, 因为它代表一个流域和河道水流的能坡, 对侵蚀产沙的影响很大。黄土高原一级支流流域坡降和干流比降总的变化有如下特点, 流域上游与地势较为平坦的风沙区、干旱草原区相连接的流域, 如无定河、皇甫川、窟野河等粗泥沙来源区流域, 以及呈狭长形的地堑式构造盆地的流域, 如泾、洛、渭、汾河流域, 总的能坡较小; 据资料显示, 位于半湿润区与土石山区相连的三川河、蔚汾河等流域和干流比降, 明显陡于其它地貌类型区(图 3), 输沙模数随着流域坡降和

干流比降的增加不断增大, 但不是无限增加, 而当增加到某一临界值后呈明显下降趋势。输沙模数分别与流域坡降( $G_p$ )和干流比降( $G_i$ )在图形上呈上占型左偏不对称的 S 形累计函数直线和 2 次抛物线变化关系:

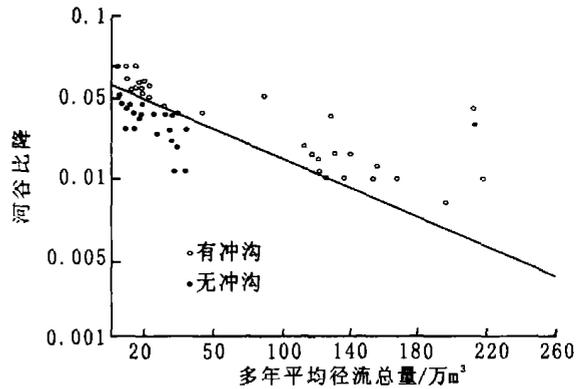


图 2 河谷比降与多年平均径流量关系

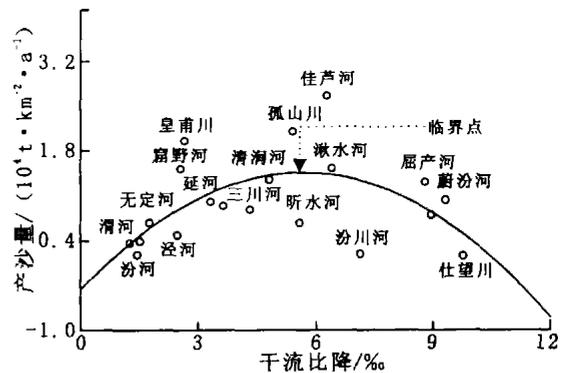


图 3 干流比降与流域产沙量的关系

$$P = -0.005 + 5.04 \lg G_p, r = 0.987 \quad n = 29 \quad (1)$$

$$S = -0.3824 + 0.6373 G_i - 0.056 G_i^2 \quad r = 0.59 \quad n = 23 \quad (2)$$

呈狭长形的地堑式构造盆地的泾、洛、渭、汾河等流域, 由于下游地势平缓的阶地和冲积平原的存在, 减少了水流的动能和输沙能力。位于东部半湿润区的汾川河和蔚汾河等流域, 上游为土石山区, 虽然地势陡峭, 但由于植被的保护作用较好, 地表岩性的抗蚀力较强, 所以侵蚀能力较弱。而位于黄土丘陵沟壑区的流域, 覆盖着疏松的厚层黄土, 在水流的作用下, 体现了千沟万壑、支离破碎、沟深谷狭、高差悬殊、梁峁起伏、坡度陡峻的黄土地貌形成过程和侵蚀产沙特点。但由于地表缺乏植被的保护、土壤抗蚀力差, 流域产沙出现峰值区。根据流域坡降和干流比降与流域输沙模数的对应关系, 其地貌临界特征值可分别用(1)式的正态累积函数和(2)式 2 次抛物线关系式定量得出(表 1), 由表 1 所示, 影响流域输沙模数的临界流域坡降和临界干流比降分别为 8.43‰ 和 5.69‰(表 1)。

## 3 地貌发育阶段的临界

从流域地貌系统的发育角度看, 不同的产沙量是受不同过程的地貌单元所具有的坡度所影响, S. A 夏姆认为: 对坡度的变化起控制作用的地貌临界, 在地貌系统内该值由于系统本身随时间的变化而发展, 只要系统还没有演化到临界的情况之前, 调整或破坏将不会发生。由上所述可以看出, 黄土高原干流比降和流域坡度对侵蚀产沙的影响, 只要还没有演化到临界以前, 即使其它地理环境要素发生了变化, 产沙

量也不会发生质的变化。

表 1 流域临界坡降和干流平均比降特征值

项目	流域坡降/‰	干流平均比降/‰
初峰值	5.49	
高峰值(临界值)	8.43	5.69
峰末值	12.9	

综上所述,对坡地系统演化阶段临界的研究甚少。W·台维斯从 19 世纪末至 20 世纪初,首先提出了地形发育阶段的学说。他的侵蚀轮回理论,把地貌归结为构造、营力和时间的函数,将地貌划分为幼年、壮年和老年三个阶段的模式,但没有给出定量的临界指标,所以只是把以往单纯从形态描述的地貌学,提高为解释性的地貌叙述。50 年代美国理论地貌学家斯揣勒(A·N·Strahler)提出了高程分析法,或面积-高程积分法<sup>[7]</sup>,进而把台维斯的地貌发育模式给以定量化,即明确的临界指标。如当高程积分值大于 60% 时,为幼年期阶段;当高程积分值小于 60%,大于 35% 时,为壮年期阶段;当高程积分值小于 35%,为老年期残丘阶段。斯揣勒积分曲线的意义,在于使台维斯的地貌发育阶段定量化了,而不足之处是在地貌发育过程中,没有反映物质迁移的状况和划分阶段的不确定性。我们在以流域为开放系统概念的基础上,运用地貌发育是内外营力相互作用和时间的函数的基本原理,根据高程积分曲线,从坡地系统侵蚀产沙的角度,提出了侵蚀积分值的概念。<sup>[8,9]</sup>所谓侵蚀积分值,是高程曲线的一个定量指标。斯揣勒认为:根据任何一个流域地形的高程曲线的形态,就可以判别流域地形的发育阶段以及目前的侵蚀产沙特性。侵蚀积分值正是反映高程曲线形态的数量指标。定

表 2 黄土高原沟谷地貌发育阶段轮回、时间和产沙的关系

侵蚀类型	加速侵蚀所占百分比/%	侵蚀早期 / 万年	临界点		侵蚀中期 / 万年	临界点		侵蚀晚期 / 万年	侵蚀模数 / (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	整个轮回时间 / 万年
			侵蚀积分值/%	侵蚀模数 / (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )		侵蚀积分值/%	侵蚀模数 / (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )			
丘陵沟壑区	0	-31 ~ -7.5	29	6665	-7.5 ~ 6.5	68	7588	6.5 ~ 32		63 ± 5
	30	-31 ~ -7.5	29	6665	-7.5 ~ 4.5	68	10150	4.5 ~ 24	2600	55 ± 5
	44		29	6665	-7.5 ~ 3.5	68	13250	3.5 ~ 20		51 ± 5
高原沟壑区	0	-7 ~ -0.5	38	1799	-0.5 ~ 8.5	60	2154	8.5 ~ 15		22 ± 3
	30	-7 ~ 0.5	38	2600	-0.5 ~ 6	60	2970	6.0 ~ 11	2000	18 ± 3
	44	-7 ~ 0.5	38	3300	-0.5 ~ 4.5	60	3600	4.5 ~ 9		16 ± 3

关于地貌发育阶段临界值和相应产沙量的确定,本文作如下简单的说明:首先建立河网密度与产沙的关系;再通过河网密度与侵蚀积分值的关系,最后建立侵蚀积分值与产沙量和时间的关系。于是得到了产沙过程方程和侵蚀积分值过程方程及其过程线,然后再对侵蚀产沙过程线方程求导,使得侵蚀模数变化率方程。通过侵蚀模数变化率方程,可以计算出表明流域系统地貌发育的临界点,该点即是自然产沙过程线的拐点;按导数的意义,自然产沙过程线对时间的两阶导数等于零,就是划分流域发育阶段的定量指标,<sup>[8]</sup>即:

$$\frac{\partial W_s}{\partial T^2} = 0$$

式中:W<sub>s</sub>——输沙模数 t/(km<sup>2</sup>·a); T——时间(万年)。此式能反映流域在不同发育阶段的产沙特征。

对上式求解可得到 T<sub>i</sub>(i=2),代入侵蚀积分值过程线方程,可得到对应确定的临界侵蚀积分值,该值即是划分流域系统发育阶段的地貌临界。它包括空间和时间两个基本内涵:一方面从流域空间形式,可以判断流域处那个阶段;另一方面还可以确定流域相应发育阶段的年代和侵蚀量。

义为:以高程曲线的上、下端点为顶点的矩形被高程曲线一分为二,上半部分面积与矩形总面积之比,即为侵蚀积分值,数学表达式为

$$E_i = \frac{HA - \int_0^h adh}{HA} = 1 - \int_0^h \frac{a}{H} dx$$

式中: H——流域地势差; A——流域面积, h——等高线的相对高度, a——等高线所切的水平断面积。通过侵蚀积分值,一方面可以划分地貌发育阶段,使地貌发育阶段的定量化;一方面也可以分析自然侵蚀量的大小和过程,从而可以推导出人类加速侵蚀量的大小和过程。侵蚀积分值可以用于对水土流失区和大江大河的治理进行宏观决策。

对黄土高原丘陵沟壑区和高原沟壑区来说,临界侵蚀积分值(E<sub>i</sub>)与流域地貌发育阶段的定量关系为:

丘陵沟壑区	E <sub>i</sub> < 29% 时, 侵蚀早期
	29% E <sub>i</sub> < 68% 时, 侵蚀中期
高原沟壑区	E <sub>i</sub> < 68% 时, 侵蚀晚期
	E <sub>i</sub> < 38% 时, 侵蚀早期
	29% E <sub>i</sub> < 60% 时, 侵蚀中期
	E <sub>i</sub> < 60% 时, 侵蚀晚期

从侵蚀积分值的判断看,目前黄土高原丘陵沟壑区正处在第二阶段之中期,侵蚀模数 10 150 t/(km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)。高原沟壑区,目前尚处于第一阶段。黄土高原沟谷地貌发育阶段、侵蚀轮回时间与产沙关系如表 2<sup>[9]</sup>由此可见,黄土高原的水土保持工作,确实是任重道远。

## 4 结 论

本文的结论如下:

(1) 黄土高原侵蚀产沙中的地貌临界,是侵蚀产沙通过地貌现象由量变到质变的“突发转化点”。超过这一界限,地貌现象将发生巨大的质的变化。不同的地貌过程具有不同的临界阈值和相应的产沙量。研究黄土高原侵蚀产沙中的一些与地貌有关的临界问题,以辨识临界条件发生发展的规律并在应用上作了进一步的探讨。

(2) 从地貌学的角度探讨黄土高原侵蚀产沙过程中存在的临界问题,如坡地系统的临界、河道系统的临界、地貌发育阶段的临界,以及临界在侵蚀产沙中的应用等,这些研究,不仅对高原地貌侵蚀产沙中地貌类型的突发转化现象,地貌要素相互作用机理、强度的合理解释和动态转化阈值区间的确定,都具有较深刻的理论意义,而且对于地貌发育过程演变趋势的预测,乃至国土的开发和整治也具有重要的实践意义。

(下转第 7 页)

其主要引种地以纬度高(北纬 47 以北)、海拔低(200 m 左右)、冷(年平均气温 1 左右)、湿(降水量 550 mm 左右,蒸发量 1 240 mm 左右)为主要生态特征。区内无天然沙棘分布,现有沙棘属植物多引自俄罗斯、蒙古等国。

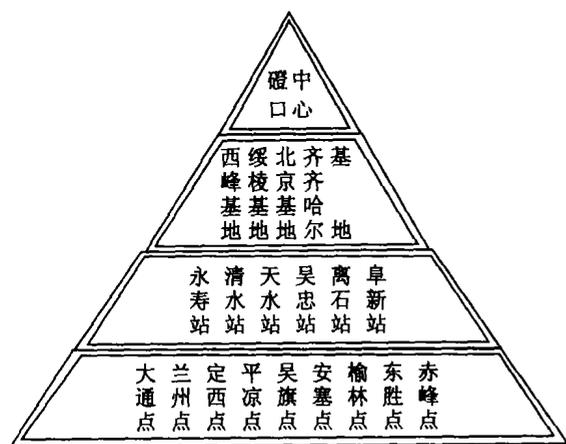


图 2 中国“三北”地区沙棘属植物良种繁育网络体系

地处东北平原与大兴安岭、小兴安岭间的过渡地段,气候冷湿,适宜种植的果实种类很少,以沙棘属植物为代表的浆果类灌木具有很高的开发价值。沙棘种植地区与俄罗斯等原产地相差在 5 之内,不论播种方法培育实生苗,还是引进无性系直接栽培,均可正常生长结实。该地带沙棘种植的主要目的是经济开发利用,但在防风固沙、盐碱地改良及护路

等方面,也已受到关注<sup>[10]</sup>。

区内已建成绥棱、齐齐哈尔等沙棘良种繁育基地,满洲里也有引种栽培试验<sup>[11]</sup>,面向高纬度、高海拔地区,品种以“大果沙棘”居多。在青海省大通县等黄土高原最西端与祁连山地过渡地带的一些高海拔地区,气候条件与东北冷湿地区十分相似,也已经开始了引种试验<sup>[12]</sup>。大通县也是中国沙棘优良品种的主要产地,主要面向黄土高原西部浅山丘陵沟壑区。

在“三北”地区 5 个沙棘种植带中,目前已初步形成 1 个中心、4 个基地、6 个站、9 个点,基本上形成了一个代表类型较多、辐射范围较广的“三北”地区沙棘良种繁育网络(图 2)。这些中心、基地、站、点,分别属于中国科学院、中国林科院、水利部黄委会、水利部沙棘开发管理中心以及一些有关省区的科研院所,相互之间关系有密有疏,但目标却相当一致,着力于种质基因资源保存和良种“选、育、繁”。目前最重要的任务,首先,是要协调好它们之间的关系,形成一个关系更加紧密的、具有实质性联合的网络体系,增加联合科研开发的力度,减少重复或非正当竞争;其次,还要继续完善网络,以使站点分布更加科学、合理、有效;第三,在每一中心、基地、站、点,要有所代表地区的沙棘基因种质资源保存圃,要有起示范作用的标准性种植园,还要有优良种苗繁育基地,而且要达到一定的示范规模。只有这样,才能真正起到推动沙棘种植开发的积极作用,促进“三北”地区的生态环境建设工作。

- 参考文献:
- [1] 高志义, 火树华. 我国沙棘事业的发展[J]. 防护林科技, 1995, (4): 28- 31.
  - [2] 胡建忠, 王愿昌, 张鉴. 沙棘对泻溜红土改良及其生长规律[J]. 水土保持通报, 1993, 13(4): 44- 50.
  - [3] 卢顺光. 沙棘在沧头河治理中作用的分析和研讨[J]. 沙棘, 1990, (2): 5- 10.
  - [4] 毕慈芬, 徐双民, 李桂芬. 砒砂岩地区沟道沙棘植物“柔性坝”原型拦沙研究[J]. 国际沙棘研究与开发, 2003, 1(1): 6- 11.
  - [5] 廉永善, 陈学林. 沙棘属植物的系统分类[J]. 沙棘, 1996, 9(1): 15- 24.
  - [6] 康永善, 陈学林, 于倬德, 等. 沙棘属植物起源的研究[J]. 沙棘, 1997, 10(2): 1- 7.
  - [7] 吴钦孝. 对引种和发展国外沙棘良种的思考[J]. 沙棘, 2003, 16(2): 7- 9.
  - [8] 黄铨, 刘明虎. 关于沙棘栽培中的适地适树问题[J]. 沙棘, 1999, 12(3): 16- 19.
  - [9] 黄铨. 中国沙棘的性状变异与演化趋势[J]. 国际沙棘研究与开发, 2003, 1(2): 6- 12.
  - [10] 孟令钦, 回莉君, 陈浩生. 松辽流域沙棘开发利用现状及发展前景[J]. 沙棘, 2000, 13(2): 43- 45.
  - [11] 石荣, 孙丽娟. 俄罗斯大果沙棘在满洲里的引种试验[J]. 内蒙古林业, 2003, (9): 33.
  - [12] 刘远光, 陈永国, 陈海庆, 等. 大果沙棘引种试验初报[J]. 青海农林科技, 2003, (4): 43- 44.

(上接第 3 页)

参考文献:

- [1] 尹国康. 地貌过程界限规律的应用意义[J]. 泥沙研究, 1984, (4): 1- 6.
- [2] Hudson, S W. Soil conservation[M]. London: Batsford, 1971. 320.
- [3] Renner, F G. Conditions influencing erosion on the Boise River watershed[R]. U. S. Dept. Agric. Tech Bull. 528. 1936. 114- 123.
- [4] 齐矗华. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究[M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 1991. 151.
- [5] 陈浩, 陆中臣, 李忠艳, 等. 流域产沙中的地理环境要素临界[J]. 中国科学, 2003, 33(17): 1010.
- [6] Schumm, S A. Fluvial Geomorphology, The historical perspective, in river Mechanics[M]. (ed) by H W Shen. 1971, 1: 110- 125.
- [7] Strahler, A N. Hyosometric(area- altitude) analysis of erosional topography[J]. Bull. Geol. Soc. Amer, 1952, 63: 1 117- 1 142.
- [8] 陆中臣, 袁宝印, 等. 黄土高原流域环境治理前景[A]. 黄土高原地区综合治理开发考察系列研究: 黄土高原地区自然环境及其演变, 第五章[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [9] 陆中臣, 等. 流域地貌系统[M]. 大连: 大连出版社, 1991. 316- 333.