

黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定

李斌兵^{1,3}, 郑粉莉², 张鹏²

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 715600; 2. 西北农林科技大学

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. 武警工程学院, 陕西 西安 710086)

摘要: 验证了国外发生浅沟侵蚀和切沟侵蚀判定式在黄土丘陵区的适用性。通过 GPS 实测数据并结合 GIS 空间分析与统计回归方法, 建立了适用于黄土高原丘陵区的发生浅沟侵蚀和切沟侵蚀判定式。研究表明, 在黄土高原丘陵沟壑区, 随着坡度的增大, 发生浅沟侵蚀和切沟侵蚀的临界值 a 增大, 高强度降雨致使判定式中汇水面积(A)的指数 b 值减小, 从而降低了汇水面积的影响作用。在假定其它因素相同时, 浅沟形成只需较小的汇水面积, 而切沟形成则需要相对较大的汇水面积; 当单位汇水面积相同时, 发生切沟侵蚀比浅沟侵蚀需要更大的坡度。利用国外研究结果预测提取的浅沟侵蚀和切沟侵蚀发生区, 明显夸大了研究区的沟蚀发生区; 而用作者所建立的判定式提取的浅沟和切沟侵蚀分布区与野外实际相当吻合。即浅沟侵蚀主要发生在 $15^\circ \sim 35^\circ$ 的沟间地上, 其分布面积占整个沟间地面积的 60%, 切沟侵蚀主要发生在大于 35° 的沟坡地上, 其分布面积占整个沟坡面积的 93%。

关键词: 浅沟侵蚀; 切沟侵蚀; 汇水面积

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)05-0016-05

中图分类号: S157.1

Geomorphic Threshold Determination for Ephemeral Gully and Gully Erosion Areas in the Loess Hilly Gully Region

LI Binbing^{1,3}, ZHENG Fenli², ZHANG Peng²

(1. College of Tourism and Environmental Science, Shaanxi Normal University, Xi'an,

Shaanxi, 710062, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling,

Shannxi 712100, China; 3. The College of Armed Police Forces of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710086, China)

Abstract: By means of GPS measurement data in research areas and combined with GIS spatial analysis and statistical regression method, this paper validated the foreign critical relations for occurring ephemeral and gully erosion in the hilly-gully region of Loess Plateau and established the critical relations for determining ephemeral gully erosion and gully erosion areas, respectively. The research results indicated that in the Loess Plateau area, with an increase of slope gradient, the threshold values (a) for occurring ephemeral gully and gully erosion increased; and meanwhile, the high rainfall intensity caused the exponential value (b) of the critical upslope area decreased, which reduced the effect of the critical upslope area. Under the same condition, occurring ephemeral gully erosion needed less critical upslope area than that of occurring gully erosion; and with the same critical upslope area, the occurrence of gully erosion needed higher slope gradient than that of occurring ephemeral gully erosion. By using the foreign critical relations of ephemeral gully and gully erosion to draw occurring areas of ephemeral gully and gully area in loess hilly-gully region, the predicted ephemeral and gully erosion area was over estimated. By using our establishing critical relations of ephemeral gully and gully to delineate occurring areas of ephemeral gully and gully area in the loess hilly-gully region, the predicted ephemeral and gully erosion area very matched to the actual distribution of ephemeral and gully erosion in the field. That is, ephemeral gully erosion mainly happened on hillslopes with $15^\circ \sim 35^\circ$, accounted for 60% of the hillslope area; and the gully erosion mainly occurred on gully slopes with more than 35° , occupied 93% of the whole gully slope area.

Keywords: ephemeral gully erosion; gully erosion; upslope area

收稿日期: 2008-04-21

修回日期: 2008-06-10

资助项目: 国家 973 项目(2007CB407201); 中国科学院西部行动计划(二期)(KZCX2-XB05-03); 西北农林科技大学创新团队计划项目(04440202)

作者简介: 李斌兵(1968-), 女(汉族), 陕西省安康市人, 博士生, 主要研究方向为地图学与地理信息系统。E-mail: libinbing8@vip.sina.com。

通信作者: 郑粉莉(1960-), 女(汉族), 陕西省蓝田县人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为土壤侵蚀过程、预报及效应评价。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn。

浅沟和切沟侵蚀在黄土高原丘陵沟壑区流域侵蚀产沙中占有重要地位。据野外观测资料表明, 浅沟和切沟侵蚀带的侵蚀产沙量占整个流域侵蚀产沙量的 50% 以上^[1]。因此, 建立黄土高原地区复杂侵蚀环境的分布式预报模型, 必须考虑浅沟和切沟侵蚀的作用和影响。为此, 必须对浅沟侵蚀和切沟侵蚀进行量化研究, 而量化研究的前提是如何通过有效方法划定流域浅沟侵蚀区和切沟侵蚀区。

有关浅沟侵蚀区和切沟侵蚀区的确定近 10 a 来取得了一定的进展。Patton 和 Schumm^[2] 对美国科罗拉多州沟蚀区的地面坡度与汇水面积关系进行了研究, 在此基础上, Begin and Schumm^[3] 得到了沟蚀发生的判定式 ($S \cdot A^b = a$, a 是沟蚀发生的临界值, b 是汇水面积的指数), 只有 $S \cdot A^b > a$ 时, 才有沟蚀发生的可能。Vandaele 等^[4] 通过对来自于不同地区的 S , A 数据分析, 得出了 a 为 0.5, b 为 0.4。目前国内这方面的研究非常薄弱, 严重限制了沟蚀过程量化研究和侵蚀预报模型的建立。由于在不同的自然地理带, 沟蚀发生发展过程不尽相同, 因此, 国外的研究结果能否适用于我国复杂的侵蚀环境还有待进一步验证。本文基于黄土高原丘陵沟壑区实测资料, 在对国外研究成果进行验证的基础上, 借助 GIS 技术和数理统计方法, 确定出适合我国黄土高原丘陵沟壑区浅沟和切沟侵蚀区的判定式, 其研究结果将加深对沟蚀过程的认识, 并为建立适用于我国复杂地形区的侵蚀预报模型提供科学依据。

1 材料及方法

1.1 研究区域概况

纸坊沟小流域位于陕西省安塞县境内, 地处延河中上游, 是延河支流杏子河下游的一级支沟, 属于黄土高原沟壑区第二副区, 其地理位置在东经 $109^{\circ} 13' 46''$ — $09^{\circ} 16' 03''$, 北纬 $36^{\circ} 42' 42''$ — $36^{\circ} 46' 28''$ 。流域面积 8.37 km^2 。受基础地形和现代土壤侵蚀影响, 流域呈现出沟谷密集, 沟壑密度高达 8.06 km/km^2 (1: 50 000 地形图取 50 m 以上沟谷量算), 地面起伏率大, 梁峁顶与沟谷高差多在 150~200 m。流域内土壤侵蚀以水力侵蚀为主, 其次为重力侵蚀。梁峁坡以片蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀为主, 沟坡以切沟、冲沟、悬沟侵蚀和重力侵蚀为主^[5], 形成沟壑密布的侵蚀景观。纸坊沟流域在气候区划上属暖温带大陆性半干旱季风气候, 据中国科学院水利部水土保持研究所安塞试验站提供的 1996—2002 年气象观测资料, 年平均降水量 448.8 mm, 且降水集中, 6—9 月降水量占到全年降水量的 71.2%, 且常为暴雨型集中降水。

1.2 汇水面积和坡度的获取方法

获取汇水面积和坡度一般有两种方法, 一种是利用实测数据进行推算, 这种方法精确度较高, 但对于获取大范围, 大数据量, 难度较大且费时费力; 另一种方法是利用数字地面模型, 结合地形分析算法来获取汇水面积和坡度; 这种方法的优点是数据处理速度快, 提取方便, 适合大范围, 大数据量的情况。本文主要利用地形分析算法, 将得到的汇水面积和坡度经过数据回归, 来推算沟蚀发生的临界地形参数, 从而界定浅沟和切沟侵蚀。为了说明研究结果的可靠性, 用 2006 和 2007 年高精度 GPS (Trimble 5700 RTK) 在安塞纸坊沟流域浅沟侵蚀区和切沟侵蚀分布区的实测数据进行回归拟合, 分别建立浅沟侵蚀和切沟侵蚀区的判定式; 为了进一步解释结果的可靠性, 将浅沟侵蚀区和切沟侵蚀划区结果与卫星影像进行对比。

汇水面积是一条浅沟或切沟所在集水区出口以上的面积, 是流经某点或某段等高线上游的所有地形的投影面积。单位汇水面积是单位长度等高线上游的汇水面积, 定义为某段等高线上游汇水面积与等高线长度的比率。本文基于 1: 1 万 DEM, 利用地形分析算法求取单位汇水面积和坡度数据。

在实际地形表面上汇水面积和单位汇水面积是依据流向和流线分布的, 流向是水流坡度的最大方向, 即坡向或其近似值; 流线是沿流向的水流路径。所以在 DEM 上求汇水面积的关键是确定流向。本文在计算汇水面积时, 选择了多流向路径算法之一的无穷方向法 Dinf^[6]。其基本思路如图 1 所示。

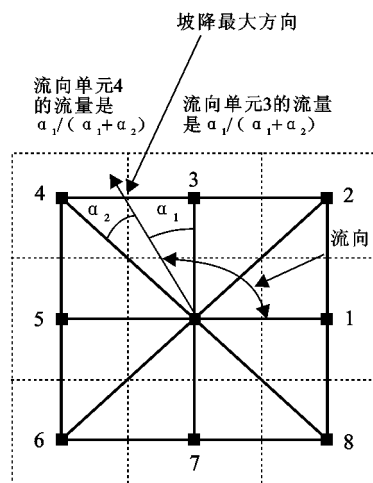


图 1 Dinf 流量分配方案

在 3×3 窗口中, 中心点与其周围 8 个格网点形成 8 个平面三角形, 分别确定每一个三角形的坡度并以最大三角形坡度作为该格网点的坡度, 该三角形坡向即为格网流向。如果三角形坡向沿 $(0, \pi/2, \pi, 3\pi/$

2) 或对角方向 ($\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$), 则水流只流向下游的一个网格, 除此之外则包含最大坡度的三角形所确定的两个下游网格作为流向分配单元, 并按其与最大坡向的接近程度分配流量。

Taudem 软件成功实现了 Dinf 算法, 并可作为控件与 ArcGIS 9.0 软件集成。本文利用 Taudem 和 ArcGIS 9.0 软件提取了每一网格的汇水面积, 根据每一网格的汇水面积可计算对应的单位汇水面积。对某一格网(i, j), 设其上游汇水面积为 A , 则按单位汇水面积的定义, 该格网的单位汇水面积

$$As = A_{ij} / D_{ij}$$

式中, $D_{ij} = \Delta x (\sin a + \cos a)$, 其中 Δx 为格网边长, a 为格网单元的坡向。

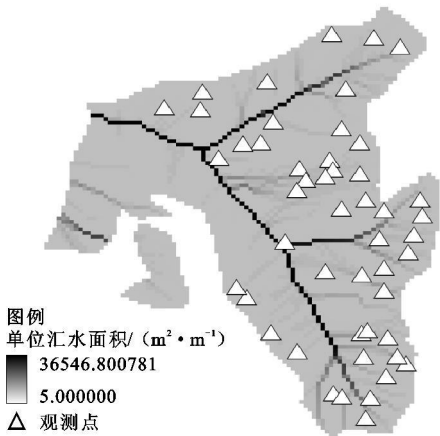


图 2 使用 Dinf 算法得到的苦荞沟单位汇水面积

图 2 为利用 Dinf 算法得到的苦荞沟单位汇水面积的结果, 格网点最大单位汇水面积为 36 546.8 (m^2/m), 最小为 5 (m^2/m)。

2 结果与讨论

2.1 国外研究结果在研究区的应用分析

首先将 Vandaele 沟蚀区提取公式 $S \cdot A^{0.4} > 0.5$, 应用在黄土高原纸坊沟拐沟子流域, 得浅沟侵蚀分布区。

将提取的浅沟分布区(图 3)与实际浅沟分布区(图 4)进行对比, 发现 Vandaele 公式明显夸大了浅沟侵蚀区的分布, 使浅沟分布区占全拐沟流域面积的 98%; 而实际浅沟分布约占沟间地总面积的 60%。再者, 实际上拐沟流域浅沟主要分布在梁坡上, 用 Vandaele 公式提取的浅沟区在沟缘线以下的沟坡也有分布, 而实际上这些部位主要以切沟和重力侵蚀为主。分析 Vandaele 研究结果在黄土高原应用出现偏差的主要原因, 可能是与黄土高原特殊的地形、地貌和气候条件有关。例如, 在拐沟流域, 坡度的平均值

是 0.56%, 而 Vandaele 在比利时和葡萄牙的选区平均坡度小于 0.25%, 坡度的显著差异, 引起了临界值的变化。其次, 黄土高原是年平均降雨量少的半干旱地区, 降雨多为高强度, 低频率的暴雨, 产生同样的降雨能量, 需要更大的汇水面积, 造成汇水面积指数 b 的值与国外汇水面积指数 b 值有所不同。



图 3 Vandaele 公式提取的拐沟浅沟

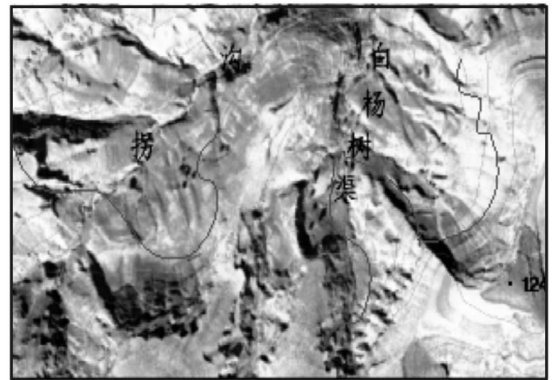


图 4 拐沟的遥感影像
(黑色为浅沟发生区; 白色为流域沟缘线)

综上所述, 由于黄土高原丘陵沟壑区的特殊地形地貌与气候条件, 国外的研究结果在这一地区并不适用。因此, 必须建立适用于黄土高原地区浅沟和切沟侵蚀区的判定式。

2.2 浅沟和切沟侵蚀区的判定式的建立

分别选取纸坊沟流域子流域苦荞沟 32 个坡度大于 35° 测量点和拐沟 50 个坡度小于 30° 的测量点, 在 2006 年和 2007 年利用高精度 GPS 进行测量, 获取各点的三维数据, 然后这些测试点依据计算单位汇水面积的算式($As = A_{ij} / D_{ij}$), 获取对应格网点的单位汇水面积 $As (m^2/m)$ 和坡度, 再将对应格网点的单位汇水面积 $As (m^2/m)$ 和坡度 $S (m/m)$ 点绘在双对数坐标图上(图 5), 发现二者呈现明显的负相关, 且可用幂函数表示, 其回归分析结果如表 1 所示。表 1 表明, 浅沟侵蚀区的 a 值明显小于切沟侵蚀区 a 值, 反

映了浅沟侵蚀和切沟侵蚀发生的临界参数的差异, 而 b 值差异较小。

表 1 单位汇水面积与坡度回归分析

项目	a	b	R	样本数
切沟	1.964 8	0.135 1	0.78	32
浅沟	0.522 7	0.104 5	0.81	50

由表 1 中的参数得到浅沟侵蚀区判定式为: $S \cdot A^{0.1045} > 0.5227$; 切沟侵蚀区判定式为: $S \cdot A^{0.1351} > 1.9648$ 。将浅沟和切沟判定式和 Vandaele 沟蚀区判定式 $S \cdot A^{0.4} > 0.5$ 对比看出, 研究区判定式参数与国外不同, 其中, 单位汇水面积指数相比国外单位汇水面积指数较小而临界值相比国外临界值较大, 原因在于黄土高原地区坡度的增大引起了临界值 a 的增大, 其次, 黄土高原高强度的降雨致使较小的汇水面积就可以产生同样的径流能量, 因此, b 值在黄土高原地区有所减小, 从而降低汇水面积的影响作用。

将浅沟判定式和切沟判定式进行比较可以看出, 切沟形成的临界值大于浅沟发生的临界值, 说明了假定在坡度相同时, 切沟形成时所需的汇水面积要比浅沟大。因此, 在假定其它因素相同的情况下, 浅沟形成只需较小的汇水面积, 而切沟发育则需要相对较大的汇水面积; 其次, 说明了假定单位汇水面积相同时, 发生切沟侵蚀比浅沟侵蚀需要更大的坡度。

2.3 研究结果验证

将取得的参数数据在拐沟做测试检验, 利用 GIS 空间分析技术, 提取生成了浅沟、切沟发生部位图(图 6)。对比图 4 和图 6, 发现提取的浅沟和切沟分布与实际浅沟和切沟发生非常吻合。将图 6 坡度和沟间地分布通过叠加分析, 得出浅沟分布于沟缘线以上, 主要集中在 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的沟间地上, 其浅沟分布面积占整个沟间地面积的 60%, 大于 35° 的沟坡地上以切沟侵蚀为主, 其分布面积占整个沟坡地面积的 93%。坡顶上既不发生浅沟侵蚀, 也不发生切沟侵蚀。

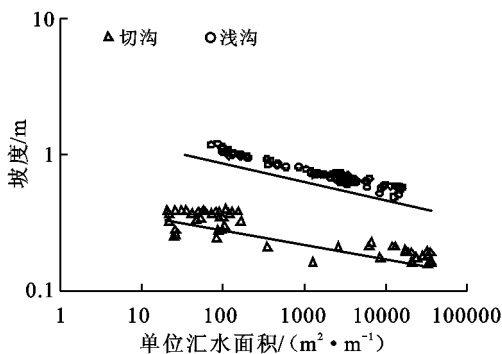


图 5 纸坊沟流域浅沟和切沟单位汇水面积和坡度关系图

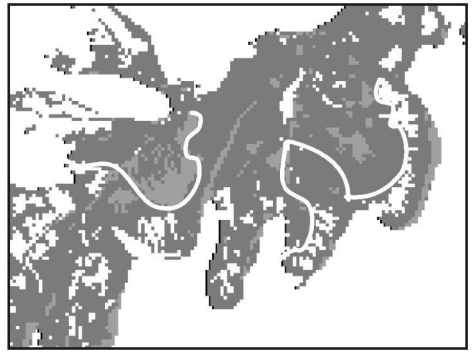


图 6 拐沟浅沟(黑色)和切沟(白色)的分布 (灰色为非浅沟和非切沟发生区)

3 结论

本文验证了国外发生浅沟侵蚀和切沟侵蚀判定式在黄土高原丘陵区的适用性。通过 GPS 实测数据并结合 GIS 空间分析与统计回归方法, 建立了适用于黄土高原丘陵区的浅沟侵蚀和切沟侵蚀判定式, 即浅沟侵蚀区判定式为 $S \cdot A^{0.1045} > 0.5227$; 切沟侵蚀区判定式为: $S \cdot A^{0.1351} > 1.9648$, 并利用判定式预测了研究流域的浅沟侵蚀和切沟侵蚀发生区。

(1) 利用国外研究结果提取的浅沟侵蚀和切沟侵蚀发生区, 明显夸大了研究区的沟蚀发生区。所提取的浅沟发生区占研究流域面积的 98%; 而实际浅沟发生区约占沟间地面积的 60%。再者, 从分布上看, 实际研究流域浅沟主要分布在梁坡上, 而用国外研究结果提取的浅沟发生区在沟缘线以下的沟坡也有分布, 而在实际研究流域这些部位主要以切沟和重力侵蚀为主。

(2) 从本文获得的浅沟和切沟判定式可知, 黄土高原丘陵沟壑区单位汇水面积和坡度呈负幂相关关系, 这一点与国外判定式一致, 但由于黄土高原丘陵沟壑区的特殊地形、地貌和气候条件, 研究区判定式的临界值和指数因子与国外判定式有很大不同, 其中, 单位汇水面积指数相比国外单位汇水面积指数较小而临界值相比国外判定式临界值较大, 表明了黄土高原地区, 随着坡度的增大, 引起沟蚀的临界值 a 也要相应增大; 其次, 黄土高原高强度的降雨致使较小的汇水面积就可以产生同样的径流能量, 因此, b 值在黄土高原地区要有所减小, 从而降低汇水面积的影响作用。

(3) 切沟形成的临界值大于浅沟发生的临界值, 在假定其它因素相同的情况下, 浅沟形成只需较小的汇水面积, 而切沟发育则需要相对较大的汇水面积; 当单位汇水面积相同时, 发生切沟侵蚀比浅沟侵蚀需要更大的坡度。

(4) 将本文提出的判定式应用到浅沟侵蚀和切沟侵蚀分布提取中, 结果与实地情况相符, 浅沟和切沟分布结果显示, 浅沟侵蚀主要发生在 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 的沟间地, 分布面积占整个沟间地面积的 60%, 切沟侵蚀主要发生在大于 35° 的沟坡地上, 占整个沟坡地的 93%。

(5) 临界公式所需参数少且容易从地形图和卫片上获得, 为该公式的推广应用提供了有利条件。

[参 考 文 献]

- [1] 郑粉莉, 高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟 [M]. 西安: 陕西人民出版社, 2000: 96—119.
- [2] Patton P C, Schumm S A. Gully erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon [J]. *Geology*, 1975,

3: 83—90.

- [3] Begin Z B, Schumm S A. Instability of alluvial valley floors: a method for its assessment [J]. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 1979, 22: 347—350.
- [4] Vandaele K, Poesen J, Govers G, et al. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision [J]. *Geomorphology*, 1996, 16: 161—173.
- [5] 唐克丽, 席道勤, 郑世清, 等. 杏子河流域的土壤侵蚀方式及其分布规律 [J]. *水土保持通报*, 1984, 4(5): 10—19.
- [6] Tarboton D G. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(2): 309—319.

(上接第 15 页)

3.2 三种测量方法估算侵蚀量的对比

Leica HDS 3000 激光扫描仪的估算误差在 3 种测量里面最小, 仅为 4.56%。每次降雨后的坡面侵蚀量估算值并没有成规律性变化。测针板法计算误差值在 3 种测量里面最大, 达到了 -12.78%。而且, 测针板法测量侵蚀量比实际测量侵蚀量小, 但是仍然可以满足实验人员的观测要求。高精度 GPS 的估算误差介于两者之间, 为 7.38%, 侵蚀量的估算值与实际值之间的误差随着降雨场次的增加和坡面侵蚀强度的加剧而逐渐减小, 并且估算侵蚀量的误差随着测量点的增多而逐渐减小。

总之, 对于沟蚀过程监测, 3 种测量方法三维激光扫描、高精度 GPS 和测针板都可运用于切沟形成的动态演变过程监测, 而且得到了令人满意的结果。对于估算侵蚀量方面, 3 种测量方法得到的结果也很理想。但是, 在水土保持方面测量体系尚不完善, 方法步骤也不健全, 这极大地限制了测量工作的进行, 在以后的研究工作中应完善水土保持测量的标准体系, 统一测量标准。

[参 考 文 献]

- [1] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨 [J]. *水土保持通报*, 1989, 9(4): 41—45.
- [2] 吴普特, 周佩华, 武春龙, 等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究 [J]. *水土保持研究*, 1997, 4(2): 47—56.
- [3] 丁文峰, 张平仓, 李勉. 地形测针板在坡面土壤侵蚀研究中的应用 [J]. *中国水土保持*, 2006(1): 46—51.
- [4] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探: 以东北漫川漫岗黑土区为例 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 16—19.
- [5] 游智敏, 伍永秋, 刘宝元. 利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 91—94.
- [6] 于泳, 王一峰. 浅谈基于 GIS 的三维激光扫描仪在水土保持方案编制中应用的可行性 [J]. *亚热带水土保持*, 2007, 19(2): 53—55.
- [7] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 中国黄土高原耕地坡度分级数据集 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 69—70.
- [8] 肖培青. 黄土丘陵区坡沟系统侵蚀产沙过程及动力学机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007: 15—18.