

景观“源、汇”的动态特性及其量化方法^{*}

许申来^{1,2}, 周昊³

(1. 中国科学院生态环境中心 城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 国家环保部环境规划院, 北京 100012)

摘 要: 正确理解景观格局与生态过程的关系是景观生态学研究的关键, 尽管基于“源”“汇”过程的景观空间负荷对比指数较好地景观格局与生态过程联系起来, 但是对于如何定量刻画“源”“汇”景观及其动态特性没有提出科学的方法。针对上述不足, 深入分析了“源”“汇”景观的动态特性, 并从景观阻力与侵蚀力平衡关系的角度提出了定量判断“源”“汇”景观格局的方法。这个方法的特点包括: (1) 基于土壤侵蚀过程判定景观“源、汇”动态; (2) 由于景观“源、汇”动态判定中充分考虑到降雨和土壤的异质性, 对环境背景值不同的地区也适用。 (3) 从距离、相对高度和坡度3个方面建立景观格局动态评价模型即景观空间负荷对比动态指数, 该指数很好地将景观格局动态与生态过程联系在一起, 使定量研究和预测景观格局与过程的关系成为可能。通过分析景观空间负荷对比动态指数与流域出口处泥沙监测值的相关性, 可以揭示某一流域景观格局对土壤侵蚀过程的影响。

关键词: “源”“汇”景观理论; 生态过程; 景观格局动态; 距离成本模型

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)06-0064-04

The Landscape Dynamics of ‘Source’ and ‘Sink’ and Its Quantification Method

XU Shen lai^{1,2}, ZHOU Hao³

(1. State Key Laboratory of Urban and Region Ecology, Research Center For Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: Exploring the relationships between landscape pattern and ecological processes is the key topic of in depth research in landscape ecology. This paper reconsiders the pattern process relationship and analyzes the reason of separation of the landscape pattern and ecological processes. In this paper, we bring forward a method to quantify the characteristics of the dynamics of the ‘sink’ landscape and ‘source’ landscape with the development of the ‘source sink’ theory, cost distance model analysis under a framework of soil erosion. This method can be used to evaluate the effect of landscape pattern upon ecological processes as related to distance, relative elevation, and slope degree, namely, location weighted dynamic landscape contrast index (DL-CD). This index links the dynamic landscape pattern to the ecological process so properly that it can be possible to quantify and predict the pattern process relationship. This method has three following major characteristics, the first feature is the quantified definition of the dynamic ‘source sink’ landscape pattern based corresponding ecological process; the second merit is a wide application for heterogeneity of environment in term of rainfall and soil. The last advantage is the evaluation of influence of landscape pattern on soil erosion with weighted dynamic landscape contrast index. Thus, the weighted dynamic landscape contrast index provides some important key reference for deepening the pattern process relationship in landscape ecology.

Key words: source sink landscape theory; ecological process; dynamic landscape pattern; cost distance model

景观格局与生态过程的关系是景观生态学研究的核心内容^[1]。目前定量分析景观格局与生态过程的主要方法是把静态景观格局指数与生态过程指标联系在一起, 但由于许多景观格局指数难以较好地反映过程的影响^[2-3], 所以, 进一步探讨有效表征景观格局和生态过程的理论与方法, 对于景观生态学的发展具有积极意义。

传统意义上的景观格局是静态的, 指不同景观要素某一瞬间的空间组合特征; 但是生态过程是动态的, 两者很多时候无法建立合适的联系, 因此需要对景观格局做重新审视, 力求寻找到一个适当的结合点。陈利顶^[4]利用“源”“汇”景观理论对景观格局与生态过程关系进行了新的方法探索, 以非点源污染作为典型生态过程, 通过分析不同景观类型及其

^{*} 收稿日期: 2008-03-17

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目(40621061); 面上基金项目(30570319); 国家科技支撑计划(2006BAC01A06)

作者简介: 许申来(1980-), 男, 内蒙通辽人, 博士研究生, 从事GIS应用和环境评价研究, E-mail: xushenlai@163.com

空间分布格局在非点源污染形成过程中的地位和作用,借用洛伦兹曲线理论,从距离、相对高度和坡度3个方面建立了不受尺度限制的景观格局评价模型——景观空间负荷对比指数。该指数可以较好地将具有面状特性的景观格局与点状监测数据有机地结合在一起,使定量研究流域景观格局与生态过程的关系成为可能。“源、汇”理论为重新刻画景观格局提供新的视角,突破了传统意义上的局限,使景观格局具有动态的含义,源汇景观格局比传统的景观格局更容易与生态过程联系,不仅可以反映格局对过程的影响,更重要的是可以反映过程对格局的作用。但是仍存在以下不足:(1)该模型只适用于环境背景相似(如降雨和土壤)的地区;(2)景观空间负荷对比指数只具有相对比较意义,仅仅反映的是景观格局对生态过程的潜在影响;(3)源汇景观的判定人为因素较强,缺乏客观的定量标准。总之由于缺乏对源汇景观动态特定的认识和对于动态景观格局的判定方法,静态的景观空间负荷对比指数很难反映在环境异质性和降雨变化以及人类主观判断等条件下的景观格局对生态过程的影响。针对目前该模型存在的问题,尝试对景观空间负荷对比指数进行修正,根据源汇景观阻力模型分析提出源汇景观格局动态及其表征方法,建立景观格局动态评价模型——动态景观空间负荷对比指数。

1 “源”“汇”景观不确定性和动态特性

1.1 土壤侵蚀过程中的景观中侵蚀力与阻力

土壤侵蚀过程是持续降雨作用下,水流和泥沙沿着形成的侵蚀沟到达河网,朝流域出口方向流动的过程^[5-6]。土壤水蚀源于降雨、融雪或人工灌溉等形成的水流对土壤颗粒的分散作用,降水是主要的土壤侵蚀力,降雨侵蚀力是各种气象因素中最直接、最重要的因素^[7-9]。影响侵蚀的降水因素主要为降水量、降水强度和径流深度;同时土壤侵蚀力还受到不同的坡度、坡长、坡形及坡面糙率对坡面流的汇集和能量转化的影响^[10]。当坡度、坡形有利于径流汇集时,则能汇集较多的径流,坡度是地形因素中影响径流冲刷力及击溅、输移的主要因素之一。坡长也是影响径流冲刷力的重要因素,坡长越长,其接受降雨的面积越大,土壤侵蚀力越大。

土壤和植被对降水具有一定的阻碍作用,这时土壤和植被成为土壤侵蚀的景观阻力。土壤抗蚀性:表层土壤的抗蚀性和抗冲性是土壤侵蚀的决定性因素^[11]。通常利用表层土壤的抗蚀性和抗冲性作为衡量土壤抵抗径流侵蚀的能力^[12-13]。表层土壤的抗蚀性越大,土壤侵蚀的景观阻力越大,土壤侵蚀量越小。影响抗蚀性和抗冲性的因素有:土壤质地、土壤孔隙、土层厚度、土壤湿度,以及土地利用方式等^[10]。植被覆盖可以减弱降水对土壤的溅蚀作用,调节地表径流、减缓径流速率、减少地表冲刷、促进拦淤。植被覆盖对土壤侵蚀和泥沙输移的影响非常大^[14]。植被覆盖度越大,土壤侵蚀的景观阻力越大,土壤侵蚀量越小。

土壤侵蚀的根本原因在于降水和特定地形条件下所产生的土壤侵蚀力大于植被和土壤在特定地形条件下产生的景观阻力。降水和地形因素可以看作是土壤侵蚀力的决定

因素,同时还取决于植被土壤对土壤侵蚀的景观阻力,这两个力的相互作用以及不断变化影响土壤侵蚀过程。

1.2 距离成本模型评价景观阻力和侵蚀力

在景观各空间组分之间,物质、能量、物种和其它信息的迁移或者交换被称为景观流。景观流是景观生态过程的外在表现形式,受景观格局的影响和控制^[15]。降水和径流可以看作是景观流,按照景观功能流理论,土壤侵蚀过程总是伴随着一系列的能量转化,它需要通过克服景观阻力来实现对景观的控制。为了反映土壤侵蚀过程中源景观与地表结构的内在联系,我们考虑3个因素,即景观汇、距离和景观阻力因子(friction factor)。借助GIS技术,采用cost distance模块来表达景观介质对景观“源”空间扩散的影响^[16],其公式如式(1)。

$$C_i = \sum (D_i \cdot F_j) \quad (i = 1, 2, 3 \dots n; j = 1, 2, 3 \dots m) \quad (1)$$

式中: D_i ——指从空间某一个景观单元 i 到汇的实地距离; F_j ——指景观空间中某一景观单元 j 的阻力值; C_i ——第 i 景观单元到景观汇的累积耗费值; n ——基本景观单元总数。

距离成本模型实质是成本距离(cost distance)的综合表达^[17]。成本距离模型是对现实的一种抽象表达,指由于地理空间的变化而带来的“成本”差异^[18]。可为景观功能随着格局变化的空间连续过程提供分析依据。成本距离(cost distance)是通过确定物质、能量在不同表面的成本系数来计算^[19],所有的成本距离分析都需要输入源点和成本系数,其值的高低代表通过的难易程度。这些耗费可能是旅行时间、金钱或精力等等^[20]。把上述土壤侵蚀的景观阻力评价因子(植被覆盖度、地表粗糙度、土壤抗蚀性)空间化,通过ARC/INFO中GRID模块的Cost distance模块循环计算,可以得到流域内景观阻力。同样把上述土壤侵蚀力评价因子(降水量、坡度、坡长)空间化,通过ARC/INFO中GRID模块Cost distance模块,可以得到流域内侵蚀力。

1.3 土壤侵蚀过程中的景观不确定性

景观“源、汇”动态:动态源汇景观格局的形成与土壤侵蚀力和景观阻力具有密不可分的关系。在侵蚀过程中,流域中一些土地利用/覆被类型起到了“源”的作用,一些土地利用/覆被类型起到了“汇”的作用,另一些起到了传输的作用^[21]。根据源汇理论,“源”是指一个过程的源头,在格局与过程研究中促进生态过程发展的景观单元类型;“汇”是指一个过程消失的地方,是阻止延缓生态过程发展的景观单元类型^[22]。在景观生态学中,如何区分“源”景观单元和“汇”景观单元,应该结合具体的过程进行分析。对于水土侵蚀过程,根据“源”“汇”景观的定义和景观中侵蚀力和景观阻力的平衡关系,如果流域内的某一点在某一时刻土壤侵蚀力大于土壤侵蚀的景观阻力,这一点在这一时刻定义为“源”;如果流域内的某一点在某一时刻土壤侵蚀力小于土壤侵蚀的景观阻力,这一点在这一时刻定义为“汇”。如果某一点在某一时刻土壤侵蚀力等于土壤侵蚀的阻碍力,这一点在这一时刻定义为“流”。通过对流域中的某一点在某一时刻的侵蚀力和阻力的分析来判断景观“源-汇”格局,克服了从前景观源汇定性判定主观性的弱点,同时为景观源汇赋予了动态的特性。

1.4 土壤侵蚀过程中的景观动态特性

景观源汇动态与生态过程: 图 1 表示在土壤侵蚀过程中, 流域内某一点的土壤侵蚀力和景观阻力随着时间变化的相互关系。可以看出, 由于降水的变化, 土壤侵蚀力随之发生变化, 随着土地利用类型的变化, 景观阻力也会发生变化, 因此这一点在不同的时刻 (T_1, T_2, \dots) 可能是“源”也可能是“汇”。即使降水相同, 但由于土壤的性质差异, 景观阻力也会发生变化, 这时源汇也会发生变化。因此, 在降雨和土壤发生变化时, 源汇的判断显得尤为重要, 实际上景观源汇格局的变化受流域各点的土壤侵蚀力与景观阻力变化的制约。实际降雨过程中, 雨量较小时, 景观中“源”少, “汇”多, 降雨较小时, 由于植被和土壤的阻碍, 很难形成径流, 没有产生侵蚀; 随着降雨的增大, “源”有所增加, “汇”有所减少, 降水量的增加促使在坡度大, 地形粗糙度较小, 土壤黏性较差的地方形成径流, 产生一定量的侵蚀; 降雨非常大的条件下, “源”多, “汇”少。由于降水量非常大, 原来“汇”的景观阻力小于目前的侵蚀力, 所以原来的“汇”变成了“源”。

景观中“源”、“汇”在概念上和时间内都是相对的, 不同的生态过程源汇景观会有所不同, 即使是相同的生态过程, 由于在不同时刻土壤侵蚀力和景观阻力的不断变化, 源汇格局也会不断变化。“源”、“汇”对生态过程中的贡献也会随时间变化而发生变化。对于不同类型“源”(或“汇”), 在研究格局对过程的影响时, 需要进一步考虑它们对过程的不同贡献。

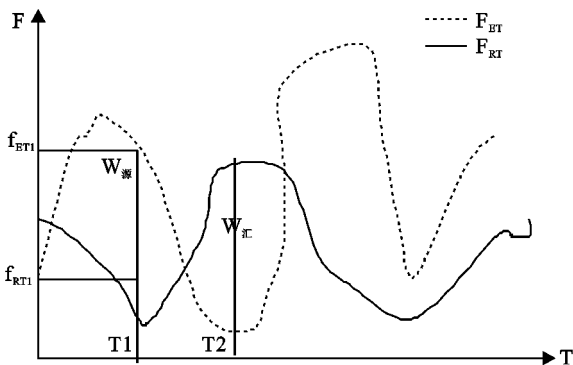


图 1 流域内任何一点的侵蚀力和景观阻力随时间的变化

2 动态景观源汇格局评价方法

对于任何流域动态源汇景观格局的评价, 不同时刻该流域的侵蚀力和景观阻力的大小是判断该时刻某一点是景观“源”或景观“汇”的关键。利用距离成本模型计算流域内任何一点的侵蚀力和阻力, 根据景观“源”、“汇”的定义得到流域在不同时刻的“源汇”格局, 在此基础上利用洛伦兹曲线理论分别计算不同时刻景观源汇单元随着距离、相对高度和坡度的累积百分比, 从距离、坡度和相对高度 3 个方面提出了不同时刻景观“源”“汇”空间负荷对比指数^[22], 通过与相应时刻的流域出口处的泥沙监测值作相关分析来分析景观格局与生态过程的关系(如图 2)。

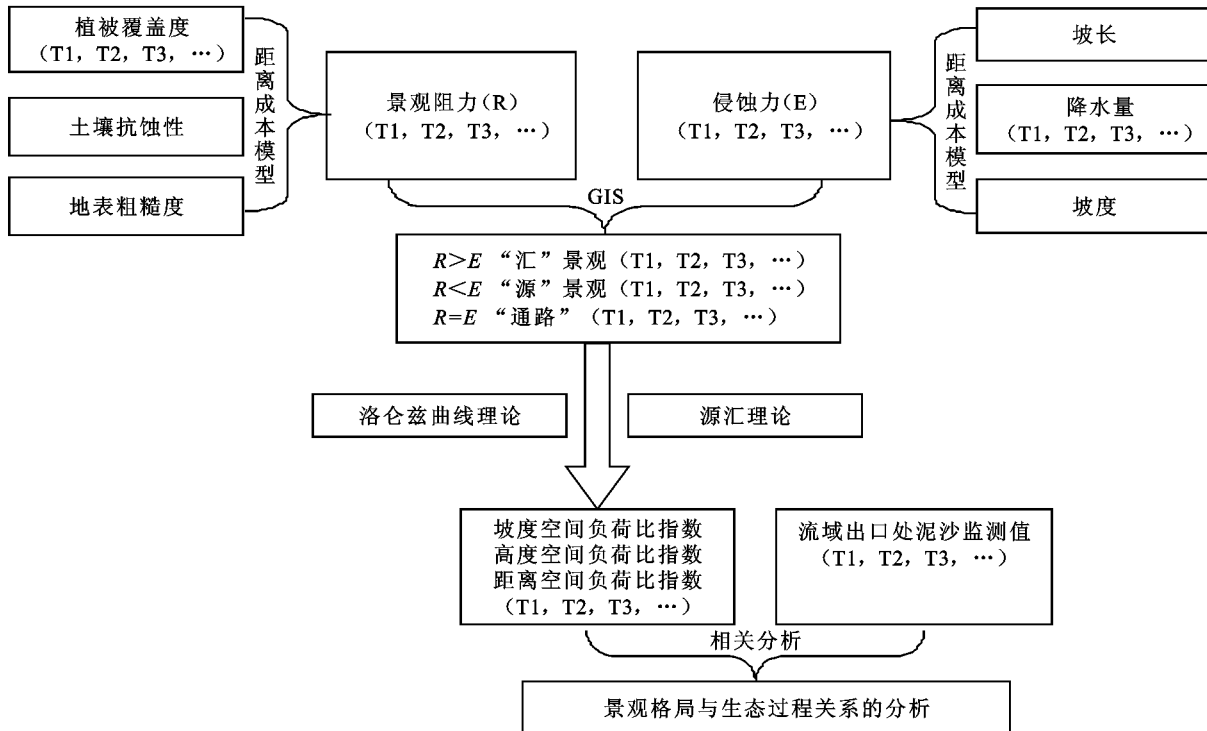


图 2 景观源汇格局负荷空间对比动态指数计算方法

根据距离成本模型模拟出流域内每一点的景观阻力和侵蚀力, 如果某一点在某时刻的侵蚀力大于景观阻力, 则这一点在这一时刻对于土壤侵蚀过程来说是景观“源”, 侵蚀力与景观阻力之差用来衡量这一时刻景观“源”促进土壤侵蚀发展的能力; 如果某一点在某时刻的侵蚀力小于景观阻

力, 则这一点在这一时刻对于土壤侵蚀过程来说是景观“汇”, 侵蚀力与景观阻力之差用来衡量在这一时刻景观“汇”阻碍土壤侵蚀发展的能力; 如果某一点在某时刻的侵蚀力等于景观阻力, 则这一点在这一时刻对于土壤侵蚀过程来说是景观“流”。由于景观阻力和侵蚀力会随着时间的变化而

不断变化,导致流域内的同一点在不同时刻可能是景观“源”或景观“汇”或景观“流”(图1);即使同样是景观“源”或景观“汇”,他们促进和阻碍土壤侵蚀的能力也会随着时间的变化而发生变化。流域内的景观源汇格局会随时间变化而不断变化,从而形成景观源汇格局动态。

借用洛伦兹曲线的理论,任何一个流域,景观“源”、“汇”单元的空间分布总是可以和流域的出口(监测点)相比,计算不同时刻源汇景观单元随着距离、相对高度和坡度的累积百分比,从距离、坡度和相对高度3个方面提出了不同时刻“源”“汇”景观空间负荷对比指数,指数的大小可以反映景观空间格局对生态过程的影响^[23]。

(1)对于任何一个流域。均可以在不同的时刻得到一个景观空间分布格局的距离指数、相对高度指数和坡度指数。 T_1 时刻动态景观空间负荷对比指数可以表示为

$$DLCI_{T1} = S_{源T1} / S_{汇T1} \quad (2)$$

式中: $DLCI$ —— T_1 时刻相对于流域出口监测点位置的景观空间负荷对比指数(距离、相对高度和坡度); $S_{源}$ 和 $S_{汇}$ ——由景观“源”、“汇”面积累积曲线组成的不规则三角形面积。

(2)景观源汇贡献率的确定。实际上,上面仅仅讨论了两种景观类型下流域景观格局指数的确定,实际上源汇景观内部不同的景观类型由于土地利用类型、地形、土壤、降雨的不同,对土壤侵蚀的贡献差异很大。为了客观准确地比较它们在土壤侵蚀形成中的作用。需要对不同源汇景观类型受到的侵蚀力和景观阻力进行标准化处理。把 T_1 时刻的侵蚀力(fE_{T1})和景观阻力(fR_{T1})之差作为源汇景观对侵蚀的贡献率($W_{源T1}$ 和 $W_{汇T1}$)。在考虑了源汇景观类型的权重后,流域景观格局的3种指数可以表示如式(3)。

$$DLCI_{T1} = W_{源T1} S_{源T1} / W_{汇T1} S_{汇T1} \quad (3)$$

(3)景观空间格局贡献的确定。利用公式(3)计算出的景观空间对比指数。并不能真正反映他们对生态过程的贡献。因为这里忽略了“源”“汇”景观单元类型在流域中的比例。对于景观“源、汇”空间分布格局完全一致的两个流域,如果景观“源”“汇”分布的比例不同,那么产生的泥沙输出量差异较大。为了能够与流域出口监测点位置获得的监测值联系在一起,需要考虑流域景观“源、汇”总量的贡献。需要将景观源汇的百分比引入到计算公式之中。由此,公式(3)可以改进为

$$DLCI_{T1} = P_{源T1} W_{源T1} S_{源T1} / P_{汇T1} W_{汇T1} S_{汇T1} \quad (4)$$

式中: $P_{源T1}$ 、 $P_{汇T1}$ —— T_1 时刻景观“源”和景观“汇”在流域中所占的百分比。

(4)景观空间负荷比动态指数的建立。土壤侵蚀过程发生在 T_1 到 T_2 这段时间,如果在这段时间内可以收集到 T_1 时刻、 T_{11} 时刻、 T_{12} 时刻、 T_{13} 时刻、 T_{14} 时刻、 T_2 时刻的降水量和植被覆盖度信息,就可以根据上述方法判断出这6个不同时刻的源汇景观格局,从而计算出这6个时刻的动态景观负荷比指数 LCI ,这样通过计算不同时刻的景观格局负荷对比指数和流域出口处的泥沙监测值联系在一起,从而将动态的源汇景观格局与动态的过程相互联系在一起。

3 景观空间负荷比动态指数的生态学意义

动态景观格局负荷比指数进一步完善和深化了源汇景

观理论和基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法,为景观格局和生态过程的紧密联系提供了可行途径。

源汇景观具有动态特性,这种动态特性与生态过程紧密联系在一起。景观空间负荷对比动态指数充分考虑了环境背景的异质性,把评价景观格局对生态过程的潜在影响提升到评价景观格局对生态过程的真实影响,在不同的地区进行比较和应用,极大地扩展了源汇理论的应用范围。

参考文献:

- [1] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等.景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [2] With K A, Crist T O. Critical thresholds in species responses to landscape structure[J]. Ecology, 1995, 76: 2446-2459.
- [3] Tishendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently[J]. Landscape Ecology, 2001, 16 (3): 235-254.
- [4] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,等.基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法[J].生态学报,2003,23(11):2406-2413.
- [5] Julien P Y. Erosion and Sedimentation [M]. USA: Cambridge University Press, 1995.
- [6] Nichols M H, Renard K G. Sediment yield from semi arid watersheds [M]. Tucson, USA: Agricultural Research Service, Southwest Watershed Research Center, 1999.
- [7] Williams J R, Nearing M A, Nicks A, et al. Using soil erosion models for global change studies [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 51(5): 381-385.
- [8] Favis Mortlock D T, Guerra A J T. The implications of general circulation model estimates of rainfall for future erosion: a case study from Brazil [J]. Catena, 1999, 37: 329-354.
- [9] Nearing M A. Potential changes in rainfall erosivity in the U. S. with climate change during the 21st century [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 56 (3): 229-232.
- [10] 张洪江.土壤侵蚀原理[M].北京:中国林业出版社,2001.
- [11] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion validation at several levels [J]. Catena, 2002, 47: 133-149.
- [12] Cammeraat L H, Imeson A C. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France [J]. Geomorphology, 1998, 23: 307-321.
- [13] Boixfayos C, Calvo C A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators [J]. Catena, 2001, 44: 47-67.

(下转第71页)

含沙量利用统计软件进行回归分析得如下关系式:

$$C=294.74Qe^{-0.39t}(R^2=0.891)$$

式中: C ——体积含沙量; Q ——设计放水流量; t ——试验冲刷时间。

(2) 设计放水流量为 3.0 L/min 情况下, 利用坡度、冲刷时间, 体积含沙量的试验资料进行回归分析得如下关系式:

$$C=33.16Se^{-0.429t}(R^2=0.889)$$

式中: C ——体积含沙量; S ——坡面坡度; t ——试验冲刷时间。

(3) 对坡度、流量与总侵蚀量进行综合回归分析得到如下关系式:

$$W=-10100.097+3961.623Q+S^{2.942}(R^2=0.979)$$

式中: W ——侵蚀量(g); S ——坡面坡度($^{\circ}$); Q ——设计放水流量(L/min)。

通过以上各式的相关关系分析, 表明体积含沙量与放水流量和坡度都呈正相关关系, 随着放水流量和坡度的增加, 体积含沙量随之增加; 而与冲刷时间呈幂指数负相关, 随着时间的增加, 体积含沙量呈递减趋势。

3 结 论

(1) 矸石坡面在水流冲刷的条件下, 颗粒移动既具有阵发性或波动性, 也具有突发性。

(2) 在较小的流量下, 如流量为 2.0 L/min 和 2.5 L/min 时, 煤矸石颗粒运移过程主要受坡度影响, 坡度较小时($<30^{\circ}$), 颗粒运移过程具有明显的波动性或阵发性; 坡度较大($>30^{\circ}$)的情况下, 颗粒运移过程主要受重力控制, 流量虽然较小, 也可能引发颗粒大规模的集中移动, 矸石颗粒运移

的突发性明显。

(3) 在不同坡度和流量下的煤矸石松散堆置体颗粒运移特征存在较大的差异。在小坡度、小流量下, 煤矸石颗粒运移的脉动性、随机性明显, 其运移过程可分为蠕变阶段、波动运移阶段和稳定运移阶段。在大坡度、大流量下, 颗粒运移的突发性明显, 煤矸石颗粒运移过程可分为大规模集中运移阶段、深层切割运移阶段和稳定运移阶段。

(4) 集中股流对煤矸石堆置体具有很强的冲刷作用, 总侵蚀量与设计流量和坡度呈正相关关系, 与时间呈幂函数负相关。

参考文献:

- [1] 刘迪. 煤矸石的环境危害及综合利用研究[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(3): 60-62.
- [2] 王春梅, 张志勇. 煤矸石的研究与综合利用现状[J]. 山西建筑, 2006, 32(21): 177-178.
- [3] 孙丰英, 徐卫东. 煤矸石堆积区地下水污染研究[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(5): 56-60.
- [4] 王凤江. 颗粒破碎对煤矸石渗透性能的影响[J]. 岩土工程技术, 2006, 20(3): 147-150.
- [5] 李德平, 张玉梅, 方继臣. 矸石山水土流失规律与防治措施的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(3): 22-25.
- [6] 王青杵, 王贵平. 黄土高原煤炭开采区水土流失特征的研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(4): 83-85, 132.
- [7] 夏卫生, 雷廷武, 赵军. 坡面侵蚀动力学及其相关参数的探讨[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 16-19.
- [8] Walker R, Craighead L. Analyzing wildlife movement corridors in Montana using GIS Environmental Sciences Research Institute[C]. Copenhagen: ESRI Inc: Proceedings of the 1997 International ESRI User Conference. 1997: 1-18.
- [9] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 453-461.
- [10] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M. Relationships between landscape characteristics and Non point source pollution inputs to coastal estuary[J]. Environmental Management, 1999, 23(4): 539-549.
- [11] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [12] Cook E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks[J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 58: 269-280.
- [13] Erskine W D, Mahmoudzadeh H A, Myers C. Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of Triassic sandstone near Sidney, NSW, Australia[J]. Catena, 2002, 49(4): 271-287.
- [14] Malanson G P. Riparian Landscapes[M]. New York: Cambridge University Press, 1995.
- [15] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Plan, 1992, (23): 1-16.
- [16] Michels E, Cottenie K, Neys L, et al. Geographical and genetic distances among zooplankton populations in a set of interconnected ponds: a plea for using GIS modeling of the effective geographical distance[J]. Ecological Modelling, 2001, 10: 1929-1938.
- [17] Niu Z G, Li B G, Zhang F R. Optimum Land Use Patterns Based on Regional Available Soil Water[J]. transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 173-177.