

## 股流作用下煤矸石坡面颗粒运移特征研究<sup>\*</sup>

呼起跃<sup>1</sup>, 胡振华<sup>2</sup>, 王电龙<sup>3</sup>

(1. 山西省水利厅水保局, 太原 030002; 2. 山西农业大学 林学院, 山西 太谷 030801; 3. 山西水利建设开发中心, 太原 030002)

**摘 要:** 在坡度为 20°, 25°, 30°, 35°, 设计流量为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 L/min 的情况下, 在室内对煤矸石颗粒进行模拟冲刷试验, 研究了煤矸石坡面颗粒运移特征。结果表明: (1) 在较小坡度和流量下, 煤矸石颗粒运移具有明显的脉动性、随机性和间歇性, 其体积含沙量变化幅度较大, 煤矸石颗粒运移过程可分为蠕变阶段、波动运移阶段和稳定运移阶段。在较大坡度和流量下, 颗粒运移呈现明显的突发性, 在冲刷初期含沙量便达到最大值, 随着时间的延续, 含沙量逐渐降低, 最后趋于稳定。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。(2) 集中股流对煤矸石堆置体具有很强的冲刷作用, 会造成严重的侵蚀, 侵蚀量与设计流量和坡度呈正相关关系, 与冲刷时间呈幂函数负相关。

**关键词:** 模拟冲刷试验; 煤矸石颗粒; 运移特征; 阵发性; 突发性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)06-0068-04

## Study on the Particle Movement of the Loose Coal Mine Waste Under Simulated Discharge

HU Qi-yue<sup>1</sup>, HU Zhen-hua<sup>2</sup>, WANG Dian-long<sup>3</sup>

(1. Soil and Water Conservation Bureau of Water Conservancy Department of Shanxi Province, Taiyuan;

2. Forestry College, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 3. Shanxi Water

Conservancy Development Center, Taiyuan 030002, China)

**Abstract:** On the basis of simulated runoff scouring experiment, the paper deals with the particle movement of the loose mine waste with slope gradient of 20°, 25°, 30°, 35° and discharge of 2 L/min, 2.5 L/min, 3 L/min, 3.5 L/min. The results showed that: with the smaller gradient and discharge, the particle movement is characteristic of undulation, randomness and intermittence, and with large fluctuation of the silt content. The particle movement process can be classified as creep movement, undulation movement and stable movement. With the bigger gradient and discharge, the particle movement is paroxysmal: at initial stage of the experiment, the silt content suddenly reached the biggest point, with the experiment continuing, the silt content gradually decreased and got to a constant finally. The particle movement process can be classified as large scale concentrating movement, cutting downward movement and stable movement. (2) Concentrated overland flow can cause serious erosion, the discharge and slope gradient is a big function of the amount of erosion volume with linear and power relationship.

**Key words:** simulated scouring experiment; coal mine waste particles; characteristics of particle movement; undulation; paroxysmal

煤矸石是在煤炭开采、洗选加工过程中所产生的固体废物, 目前煤矿的排矸量约占煤炭开采量的 10%~25%, 全国煤矸石的总积存量约 45 亿 t, 而且仍在逐年增长, 矸石山几乎成为我国煤矿的标志, 工矿区剥离、堆置的各种固体废弃物侵蚀模数是该地区自然地貌下的几倍乃至几十倍<sup>[1]</sup>。现有研究主要集中在煤矸石的工业应用, 如制砖、水泥、空心砌块和生产肥料等<sup>[2]</sup>; 另外还有煤矸石在环境污染与其物理学特性等方面的研究<sup>[3-4]</sup>。然而, 目前尚缺乏对煤矸石颗粒运移与侵蚀规律方面的深入研究, 李德平、王青桦<sup>[5-6]</sup>对矸石山侵蚀的一般规律及防治措施进行了探讨, 但对煤矸石坡面颗

粒运移的本质特征未进行深入研究, 这就需要对煤矸石特征及其运移规律进行系统的研究, 为我国社会、经济和环境可持续发展提供一定的理论支持。

本研究采用室内模拟径流冲刷试验研究煤矸石坡面水沙的运移特征, 为矿区煤矸石山的水土流失防治工作提供一定的理论基础。

### 1 试验材料与方法

(1) 试验材料及设计: 模拟试验在山西农业大学水土保持设计研究所内进行, 采用长 200 cm, 宽 40 cm, 深 50 cm 的

\* 收稿日期: 2008-02-09

基金项目: 山西农业大学科技创新基金(200213); 山西省高等院校青年教师科研专项基金

作者简介: 呼起跃(1959-), 男(汉族), 山西平遥人, 经济师, 工程师, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: dianlong02@126.com

可调节坡度径流槽。材料取自山西古交煤矿矸石山风化5 a的煤矸石(颗粒组成如表1所示),其中 $< 0.15\text{ mm}$ 的颗粒占

15.82%, $> 2\text{ mm}$ 的颗粒占57.09%,基本由片状粗颗粒组成,可见本实验的风化煤矸石属于非黏性颗粒。

表1 试验煤矸石颗粒组成

粒径/mm	$< 0.15$	$0.15\sim 0.25$	$0.25\sim 0.5$	$0.5\sim 1$	$1\sim 2$	$2\sim 5$	$> 5$
百分比/%	15.82	3.32	5.34	11.02	7.42	38.32	18.77

将煤矸石分层填入试验槽内,边填边压实,干容重控制在 $1.35\sim 1.40\text{ g/cm}^3$ ,尽可能与野外实际情况接近。试验流量采用恒压箱定水头控制。试验前测定煤矸石的含水量及干容重。根据黄土高原地区暴雨雨强标准(下、中、上限分别为: $0.5, 2, 4\text{ mm/min}$ )<sup>[3]</sup>在野外标准径流小区产生的单宽流量及李德平<sup>[5]</sup>等在野外煤矸石山径流小区实测径流量换算成径流槽内的流量,并参照王青杵等<sup>[2]</sup>煤矸石坡面径流冲刷试验采用的流量得到相应径流槽内的设计流量为: $2.0, 2.5, 3.0, 3.5\text{ L/min}$ ;坡度采用 $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 四级变化。

(2) 试验方法:试验开始后先率定放水流量,当稳定后,开始在坡面上口均匀放水,并观察坡面矸石颗粒的运移情况,同时,在堰口处设取沙桶1个,每隔1 min取一次样(全部截取),直到坡面侵蚀沟形态和矸石颗粒的移动趋于稳定,则停止取样,取样时间为 $10\sim 15\text{ min}$ 。在流量为 $2.0, 2.5\text{ L/min}$ 时由于试验较稳定,试验重复一次; $3.0\text{ L/min}, 3.5\text{ L/min}$ 时试验波动性较大,重复2次以上。

## 2 结果与讨论

### 2.1 矸石颗粒运移过程分析

#### 2.1.1 放水流量对颗粒运移过程的影响

根据实测含沙量资料,分析得到在4个坡度下体积含沙量随放水流量的变化曲线,如图1a-d。

从图1a-c可以看出,当流量为 $2.0\text{ L/min}$ 和 $2.5\text{ L/min}$ 时,3种坡度径流的泥沙含量均呈现高低起伏的波动

性或阵发性,并分别围绕 $50, 100, 150\text{ g/L}$ 上下波动;只有在 $35^\circ$ 坡面上(图1a)才显示出泥沙运动的突发性或颗粒大量的集体移动,含沙量初始值陡增到 $600\text{ g/L}$ 左右。这说明在较小流量下,水流冲击力不足以推动大量的泥沙颗粒向前移动,只有少量的泥沙颗粒在坡面上蠕动前进,并且移动过程断断续续,当后面的颗粒与前面的颗粒在蠕动过程中累积增加时,才以更大的聚积体向前移动,表现为泥沙含量的突然增大,当这个过程完成后,侵蚀沟中的泥沙进行再聚积、再累加,直到出现另外一个峰值,如此往复。因此,矸石坡面的颗粒移动既具有阵发性或波动性,也具有突发性。

从图1b-d可以看出,当流量增大为 $3.0\text{ L/min}$ 和 $3.5\text{ L/min}$ 时, $25\sim 35^\circ$ 坡面的矸石颗粒表现为极强的突发性,以大规模的聚积体群体移动。从实验过程中可以看到坡面上矸石以水石混合体的形式整体从坡面剥离的现象,其突发性强、规模大、运动速度快,冲击力强,在整个坡面上冲刷出一道近似“U”型的凹槽。只有 $20^\circ$ 的坡面(图1a)矸石颗粒表现为较强的波动性,波动幅度较大,这是由于矸石颗粒在移动过程中的蠕动、累加和突然快速前移形成的。

另外,从图中还可以看出,同一坡度下,随着流量增大,起始含沙量也在逐渐增加,同时坡面矸石颗粒变得越来越不稳定,从小规模的蠕动前移状态转变为较大规模的整体向前滑移,在实际当中可以转变为大型滑坡。因而对于矸石松散堆积体,较大的股流有可能引发灾难性的滑坡,如何分散径流,增加坡体稳定是减小侵蚀危险性的关键。

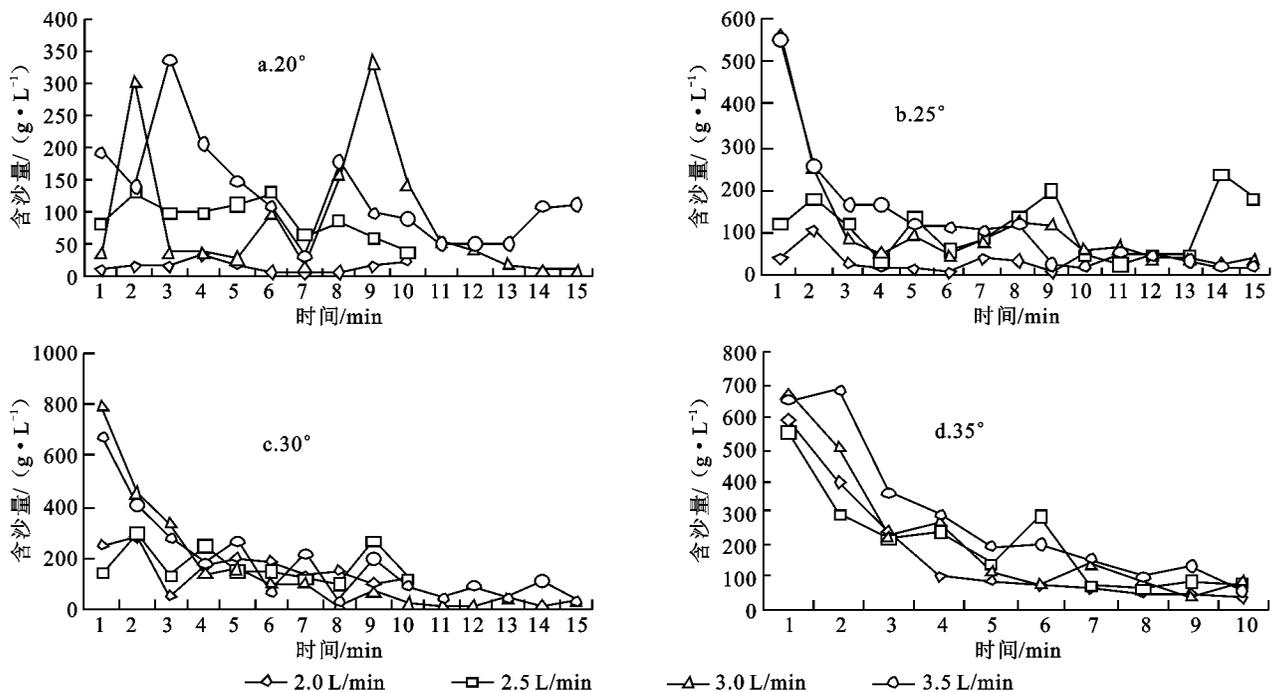


图1 不同坡度下体积含沙量的变化

2.1.2 坡度对矸石颗粒运移过程的影响

根据实测含沙量资料,分析得到在放水流量为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 L/min 4 种情况下体积含沙量随坡度增大变化曲线,如图 2a- d。

如图 2a 和图 2b,当流量为 2.0 L/min 和 2.5 L/min 时,坡度对含沙量影响十分明显。在 20° 坡面上,矸石以小股分散的颗粒移动,含沙量随时间的变化曲线比较平缓,随流量增加时含沙量略有增加;当坡度增加为 35° 时,矸石侵蚀的突发性表现尤为突出,含沙量一开始就达 600 g/L,这时的侵蚀动力主要来源于重力,水流的冲力为诱因。这表明水流一

定时,坡度较大的矸石坡面可能首先产生严重的侵蚀。随着试验的进行,坡面上部的溯源侵蚀和下部的淤积使得整个侵蚀沟坡降变缓,水流在不足以带动多数矸石颗粒时,含沙量逐渐变小,侵蚀过程趋于平缓。

如图 2c 和图 2d,当流量为 3.0 L/min 和 3.5 L/min 时,坡度对侵蚀的影响表现得已很不明显,试验一开始含沙量就达最大值,这说明此时水力侵蚀和重力侵蚀不分主次,呈现出叠加效应,含沙量达到 800 g/L。整个试验中,严重的侵蚀过程主要发生在试验的初期,表现为矸石聚积体在坡面上较大规模的整体滑移,以后以小规模的散状颗粒移动,侵蚀逐渐趋于平缓。

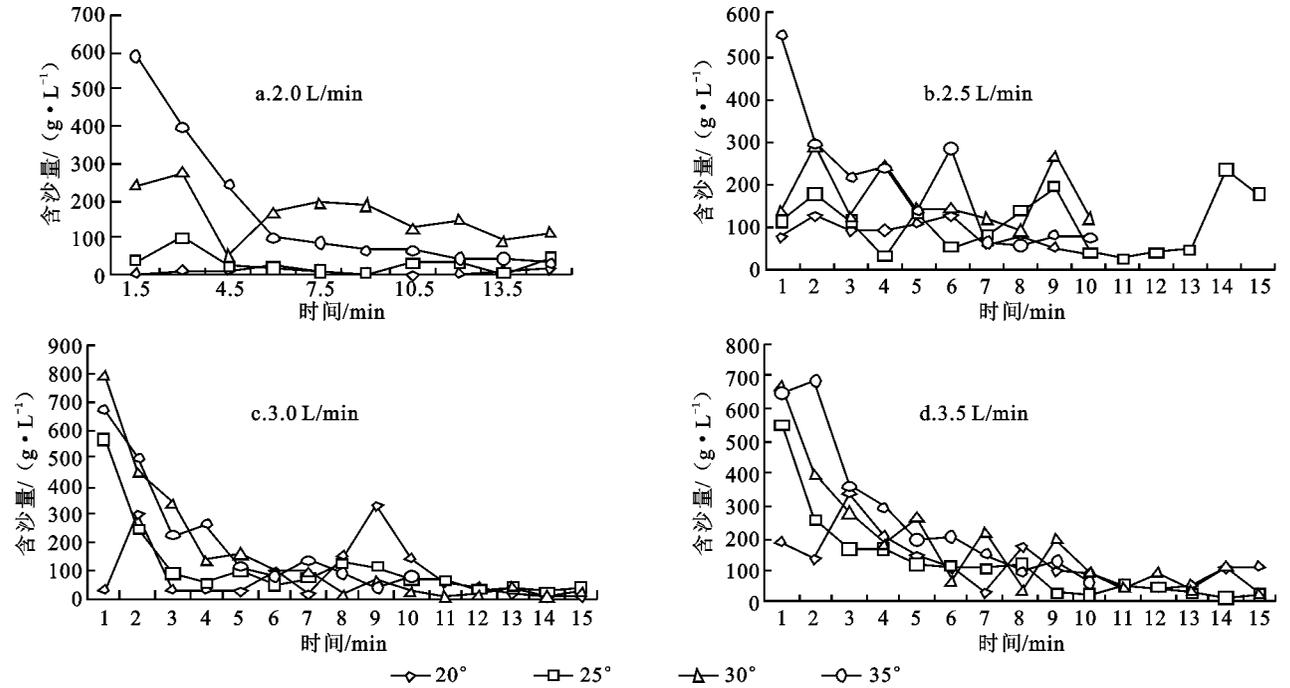


图 2 不同流量下泥沙含量的变化

2.2 煤矸石颗粒运移过程的综合分析

2.2.1 小坡度、小流量下煤矸石颗粒运移的综合分析

小坡度、小流量是指 20° 和 25° 坡面和流量为 2.0 L/min 和 2.5 L/min 时的情况。在小坡度、小流量下,径流冲刷过程中坡面颗粒运移产沙过程可分为明显的 3 个阶段。(1) 蠕变阶段。此阶段属于煤矸石表层充水饱和阶段。冲刷初期,由于径流冲刷能力弱,煤矸石表层透水能力强,大部分水量渗入煤矸石表层,只能在坡面上产生一层很薄的膜状水,较均匀地带走坡面表面一些细小的颗粒。因此,此阶段径流含沙量很小。随着煤矸石表层的不断充水饱和,坡面上产生一个或几个蠕动物沿坡面发生微小的蠕动。(2) 波动运移阶段。随着表层煤矸石不断充水饱和,坡面蠕动物的蠕动幅度会越来越大,最终导致蠕动物在重力的作用下沿坡面发生剧烈的滑塌,瞬时到达“堰口”,使径流含沙量骤增,含沙量高达 339.25 g/L。同时,在坡面蠕动物部位留下一个个微型“陡坎”。其后坡面不断发生蠕动物的滑塌,径流含沙量时升时降,颗粒运移过程呈现出一定的随机性和间歇性。(3) 稳定运移阶段。冲刷后期,由于坡面径流逐渐形成固定流路,坡面坡度由于不断有泥沙停留在“堰口”部位而逐渐变缓。此时,侵蚀沟趋于稳定,颗粒运移逐渐减弱并趋于稳定。

2.2.2 大坡度、大流量下颗粒运移的综合分析

大坡度、大流量是指 30°, 35° 的坡面和流量为 3.0, 3.5 L/min 的情况。在两种坡度和流量组合的情况下,坡面颗粒运移特征随冲刷时间发生阶段性变化:(1) 大规模集中运移阶段。试验初期,坡面大量细小颗粒和松散物质在强大地表径流的剥蚀和冲击下呈大规模集体顺坡移动,具有明显的突发性,并在坡面上冲刷出宽浅的侵蚀沟。(2) 深层切割运移阶段。侵蚀沟形成后,径流多汇集于沟道中,形成了固定流路,煤矸石颗粒在径流的带动作用产生强烈的下切侵蚀,沿沟纵坡形成多个大大小小的陡坎,煤矸石颗粒整体呈现跃移式前进,能量不断加强,陡坎顶部不断发生小规模崩塌,造成溯源侵蚀和侧向侵蚀。从整个坡面的形态来看,坡面上部侵蚀沟宽而浅,到坡面下部时侵蚀沟变窄变深。(3) 稳定运移阶段。此阶段侵蚀沟发育基本停止,水流能够携带的煤矸石颗粒也很有限,颗粒的运移状况趋于稳定。

2.3 含沙量与坡面坡度、设计放水流量和试验冲刷时间的相关关系分析

通过体积含沙量对坡度、设计放水流量和试验冲刷时间等因子的回归分析得到以下 3 个相关性较好的方程。

(1) 在坡面坡度为 35° 情况下,对流量、冲刷时间和体积

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.

(上接第67页)