

极端干旱区葡萄 SPAC 系统水流阻力规律研究

刘洪波^{1,2}, 白云岗², 张江辉², 虎胆·吐马尔白¹

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049)

摘要:在极端干旱条件下,以成龄无核白葡萄为研究材料,采用滴灌技术研究不同水分处理下气孔阻力连日变化及其与蒸腾速率、土壤水势、叶水势的关系,并分析水流阻力的分布及变化规律。结果表明:各水分处理在灌水后均随着时间的推移,蒸腾速率缓慢下降,其中高水处理的蒸腾速率最大,低水居中,中水最低,气孔阻力与蒸腾速率的变化趋势相反,表现为随灌水时间的延伸而增大;气孔阻力随着叶水势的减小而增大,呈显著负相关关系,且在高水与中水处理中,气孔阻力仅与 20 cm 土层以上土壤水势呈极显著相关,而低水处理气孔阻力与 20—30 cm 土层土壤水势呈极显著相关;在各水流阻力中,叶—气系统水流阻力最大,占该连续体中水流总阻力的 98.8%~99.0%,植株体内水流传输阻力次之,占该连续体中水流总阻力的 1.0%~1.2%。不同水分处理 SPAC 系统中的水流阻力变化规律一致,均为叶—气系统水流阻力最大,植株体内水流传输阻力次之,而土壤阻力最小,占该连续体中水流总阻力的比例小到可忽略不计。

关键词:葡萄; 土壤—植物—大气连续体; 水流阻力; 气孔阻力

中图分类号: S152.7

文献标识码: B

文章编号: 1005-3409(2011)06-0185-05

Study on the Rule of Hydraulic Resistance of Grape in SPAC System in Extreme Arid Region

LIU Hong-bo^{1,2}, BAI Yun-gang², ZHANG Jiang-hui², Hudan · Tumaerbai¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830049, China)

Abstract: The water distribution and variation of resistance, the stomatal resistance under different water treatments for a few days, and the relationship between stomatal resistance, soil water potential and leaf water potential were studied with the mature Thompson Seedless grapes as research material, with the drip irrigation technology in the extreme drought condition. The results showed that: the transpiration rate in each of the water treatments is getting slower over time after the irrigation. The transpiration rate of the high water treatment is the highest, the transpiration rate of low water treatment is in the middle, and lowest treatment has the lowest rate. The stomatal resistance performed the opposite trend compared with the transpiration rate, increasing as the irrigation time extends. The stomatal resistance is getting larger as the leaf water potential is getting smaller, showing the negative correlation. The stomatal resistance is only significantly related to soil water potential of 0—20 cm layer in high and middle water treatments, and related to soil water potential between 20 cm and 30 cm significantly in low water treatment. The flow resistance of leaf-air system is the largest in every flow resistances, taking up 98.8%~99.0% of the total flow resistances in this continuum, whereas the flow resistance in the plants ranks the second position, taking up 1.02%~1.21%. The soil resistance is the smallest, takes the negligible proportion.

Key words: grape; soil—plant—atmosphere continuum; hydraulic resistance; stomatal resistance

吐哈盆地是著名的葡萄生产基地,也是严重缺水
的极端干旱区。土壤—植物—大气连续体 (soil—
plant—atmosphere continuum, 简称 SPAC) 中水分
的传输是从土壤到达植物根系、进入根系、由植物的

收稿日期: 2011-05-05

修回日期: 2011-06-12

资助项目: 国家科技支撑计划(2011BAD29B05); 新疆自治区科技攻关项目(200931105); 水利部公益性行业科研专项(201001066)

作者简介: 刘洪波(1982—), 男, 湖北天门人, 硕士生, 主要从事水分高效利用研究。E-mail: lhb090@163.com

通信作者: 白云岗(1974—), 男, 新疆奇台人, 高级工程师, 主要从事农业水土工程方面的研究及技术推广工作。E-mail: xjbaiyg@yahoo.com.cn

木质部到达植物叶片,再由气孔扩散至大气中去,从而形成了一个统一的动态系统。在 SPAC 系统中,水流阻力的确定是 SPAC 系统水分研究中一个很重要的方面,自 Phillip 在 1966 年提出了土壤—植物—大气连续体的概念后,国内外对 SPAC 的研究无论在理论上还是在实践上都开展了大量的工作。如康绍忠、冷石林、邵明安等学者^[1-5]讨论研究了 SPAC 系统中水流阻力的分布规律以及势能传输变化规律,郭庆荣、张喜英等^[6-11]针对小麦、玉米以及油松人工林等水流阻力进行了研究并计算得到所研究作物的水流阻力值,张斌^[12]对不同耕作制度下大豆、花生等作物气孔阻力和水流阻力的分布及其日变化规律进行了研究。本文旨在针对该区的气候环境,葡萄园 SPAC 系统中土壤水势、叶片水势和大气水势等值的测定得到气孔阻力和水流阻力的变化规律,了解水分运行机制,更好地指导灌溉。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验地点位于新疆吐鲁番地区鄯善县的新疆葡萄瓜果开发研究中心试验基地,地理坐标北纬 42.91°,东经 90.30°,海拔 419 m,年降雨量 25.3 mm,年蒸发量 2 751 mm,≥10℃积温为 4 522.6~5 548.9℃,全年日照时数 2 900~3 100 h,平均日较差为 14.3~15.9℃,最大可达 17~26.6℃,无霜期 192~224 d。土壤质地主要为砾石土壤土。葡萄品种为无核白,1981 年定植,树龄 28 a,大沟定植,东西走向,沟长 54 m,沟宽 1.0~1.2 m,沟深 0.5 m 左右;株距 1.2~1.5 m,行距 3.5 m;栽培方式为小棚架栽培,棚架前端高 1.5 m,后端高 0.8 m。

1.2 试验设计

试验采用地面滴灌方式,设高水 X_1 (14 775 m³/hm²)、中水 X_2 (7 950 m³/hm²) 和低水 X_3 (5 850 m³/hm²) 3 个不同的水分处理,每个处理设 2 个重复,小区面积 0.028 hm²。

1.3 试验内容与方法

1.3.1 葡萄叶片水势 采用 PMS 压力室水势仪测定叶水势,于 2010 年葡萄成熟初期选择一个灌水周期(7 月 20—26 日)晴朗天气连续观测,从 8:00—20:00 每 4 h 测一次,测定部位为主葡萄枝从下往上数第 3 叶,每处理测 6 片叶片,取其平均值。

1.3.2 土壤水势 土壤水势利用 DLS-II 负压计测定 20,30,50 cm 土层负压。

1.3.3 土壤含水率 土壤含水率采用 TRIM-IPH 中子仪测定,在 2010 年 7 月 20—26 日上午 8:00 观

测不同处理 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层含水率。

1.3.4 大气水势 监测仪器选用的美国 COMP-BELL 公司生产的气象监测系统,主要观测项目包括大气温度、大气相对湿度等,系统全天候自动观测,20 min 观测 1 次。

1.3.5 气孔阻力 采用 CIRAS-2 型光合仪在 8:00 测定叶片气孔导度,每个处理选取 9 片长势均匀、无病虫害且角度一致的新成熟叶片,取其平均值。

2 理论计算公式

2.1 大气水势

大气水势(ψ_a)采用热力学中化学热的概念来计算,其计算公式^[13]为:

$$\psi_a = RT/V_w \ln R_H \quad (1)$$

式中: R ——普适气体常数,其值为 8.31[(Pa·m³)/(mol·K)]; T ——绝对气温(K); V_w ——水的摩尔体积,其值为 1.8×10⁻⁵ m³/mol; R_H ——大气的相对湿度。将 V_w 、 R 的值代入式(1)即得 $\psi_a = 4.6248 \times 10^5 T \ln R_H$

2.2 土壤阻力

土壤阻力(R_s)采用 Gardner—Gowan 公式^[14]计算,仅需土壤基质势资料,即:

$$R_s = \sum R_{si} = \sum 5.0 \times 10^{-4} (\psi_m / \psi_{ms})^{2.57} \quad (2)$$

式中: ψ_m ——土壤基质势(MPa); R_{si} ——第 i 层土壤阻力[Pa/(W·m²)]; i 取 50 cm 以上土层; ψ_{ms} ——土壤水分特征曲线上饱和点的进气值(W/m²); R_s ——土壤阻力[Pa/(W·m²)]。

2.3 植物体的阻力

植物体的阻力(R_p)也就是植物体的传导阻力,包括植物根系阻力、茎和叶肉阻力,可表示为:

$$R_p = (\psi_m - \psi_L) / T - R_s \quad (3)$$

式中: R_p ——植物体的阻力[Pa/(W·m²)]; ψ_m ——土壤基质势(MPa),在忽略重力势的作用时,土壤水势主要由土壤基质势构成; ψ_L ——植物叶水势(MPa); T ——植物叶片的蒸腾速率[mmol/(m²·s)]。

2.4 叶—气系统的水流阻力

叶—气系统的水流阻力(R_{la})主要包括叶肉阻力、角质层阻力、气孔阻力、叶片周围宁静空气层阻力和冠层上方边界层阻力。角质层阻力相对于气孔阻力来说要大得多,叶片水分散失的主要路径是气孔,叶肉阻力较小,可以忽略不计,在叶气孔水分散失路径中的水流阻力主要是气孔阻力和叶片层流边界层及冠层上方湍流边界层的阻力。叶—气系统的总水流阻力 R_{la} 可根据叶—气系统水势差和蒸腾速率求得:

$$R_{la} = (\psi_L - \psi_a) / T$$

3 结果与分析

3.1 葡萄蒸腾速率与气孔阻力连日变化

由不同水分处理下蒸腾速率连日变化(表 1)可看出,3 个不同的水分处理高、中、低的连日变化均呈下降趋势。各水分处理均在灌水后第一天取得最大值,随着时间的推移而逐渐下降,然后在下次灌水前达到最低点,且 3 个水分处理中,高水处理蒸腾速率每天均为最大,低水处理居中,中水处理的蒸腾速率最低。

表 1 不同水分处理下蒸腾速率连日变化 mmol/(m²·s)

日期(月-日)	X ₁	X ₂	X ₃
07-20	5.18	4.44	4.61
07-21	5.11	4.02	4.29
07-22	5.06	4.08	4.21
07-23	5.06	3.54	3.55
07-24	4.54	3.12	3.46
07-25	3.84	2.98	3.13
07-26	3.71	2.58	2.84

表 2 中各水分处理的变化规律明显,均随着灌水后时间的延伸而呈增大趋,其中中水处理气孔阻力最大,低水次之,高水最低,可见葡萄气孔阻力的连日变化趋势与蒸腾速率的连日变化趋势相反。

表 2 气孔阻力与叶片水势的关系

处理	回归方程	x 取值范围	相关系数
X ₁	$y = -6.545x^2 - 14.325x - 1.075$	$-0.77 \leq x \leq -0.34$	-0.952**
X ₂	$y = -28.968x^2 - 49.315x - 11.959$	$-0.91 \leq x \leq -0.45$	-0.913**
X ₃	$y = -18.012x^2 - 35.955x - 9.998$	$-0.93 \leq x \leq -0.54$	-0.929**

注: ** 代表 0.01 水平的显著性; y——气孔阻力[mol/(m²·s)]; x——叶片水势(MPa)。

在一个灌水周期内,由气孔阻力与土壤水势的相关分析(表 4)结果表明:气孔阻力随土壤水势减小而增大,高水与中水处理中气孔阻力仅与 20 cm 土层以上与土壤水势极显著相关,而低水处理气孔阻力与 20—30 cm 土层土壤水势极显著相关,各水分处理在 50

表 2 不同水分处理下气孔阻力连日变化 mmol/(m²·s)

时间(月-日)	X ₁	X ₂	X ₃
07-20	3.24	3.82	3.70
07-21	3.70	5.22	5.15
07-22	4.03	6.33	5.68
07-23	4.48	7.25	6.13
07-24	5.18	7.94	7.25
07-25	5.85	8.47	7.58
07-26	5.92	9.01	7.87

3.2 气孔阻力与叶片水势、土壤水势的关系

气孔是植物与外界进行气体交换的通道和控制蒸腾的结构,气孔的开闭调控着植物的气体交换和水分蒸散,而气孔阻力是 SPAC 系统中叶—气系统水分运移气孔路径上的主要阻力^[11]。因此,对不同水分处理下气孔阻力与土壤、叶片水势进行相关分析。结果显示(表 3):各水分处理在灌水后虽然都表现出随着叶水势减小而气孔阻力增大的趋势,但只有高水处理气孔阻力与叶水势极显著相关。叶水势和气孔阻力受多种因素影响,如气象因素,同时也会受到作物本身生理过程调节的影响,如在葡萄成熟时期,该地区气温较高,可能导致由于气孔调节形成的气孔阻力变化与叶水势变化的不同步。

cm 土层深度上气孔阻力对土壤水势的影响小于 50 cm 土层以上气孔阻力对土壤水势的影响,且由相关系数可看出气孔阻力在 30 cm 土层以上对土壤水势作用关系明显,说明气孔阻力同样适宜于作为土壤干旱胁迫指标。

表 4 气孔阻力与土壤水势的关系

处理	土层/cm	回归方程	x 取值范围	相关系数
X ₁	20	$y = -14639.494x^2 - 420.37x + 2.884$	$-11.8 \leq x \leq -1.83$	-0.949**
	30	$y = -31799.891x^2 - 645.348x + 2.766$	$-8.7 \leq x \leq -3.4$	-0.931**
	50	$y = 11765x^2 - 83.75x + 2.791$	$-13.7 \leq x \leq -3$	-0.824*
X ₂	20	$y = -671.476x^2 - 111.906x + 4.105$	$-72.6 \leq x \leq -3.4$	-0.957**
	30	$y = -1139.988x^2 - 144.337x + 4.282$	$-69.2 \leq x \leq -3.2$	-0.909**
	50	$y = -7443.127x^2 - 502.558x + 2.138$	$-20.2 \leq x \leq -3$	-0.919**
X ₃	20	$y = -399.326x^2 - 80.207x + 3.73$	$-82.5 \leq x \leq -7.8$	-0.949**
	30	$y = -32493.036x^2 - 1137.355x - 1.592$	$-14.1 \leq x \leq -5.5$	-0.979**
	50	$y = -94742.55x^2 - 1398.814x + 2.711$	$-8.7 \leq x \leq -1.3$	-0.900**

注: * 代表 0.05 水平的显著性; ** 代表 0.01 水平的显著性; y——气孔阻力[mol/(m²·s)]; x——土壤水势(MPa)。

3.3 连续体中能量变化及分布规律

吐哈盆地鄯善县试验区葡萄园一个灌水周期的土壤基质势 ψ_m 、叶水势 ψ_L 及大气水势 ψ_a 的变化状况见表 5。从表 5 可知, 试验区土壤基质势呈明显的规律性, 各处理不同深度上的土壤水势表现为随着灌水后时间的延长而逐渐减小。葡萄叶片水势总体上反映出从大到小的趋势, 叶水势除与土壤的含水量有关外, 还与大气湿度, 相对湿度以及辐射等有关。

极端干旱区葡萄园土壤—叶片—大气连续体中能量分布规律为: 水分从土壤到达植物根表皮、进入植物根系通过茎到达叶片, 其能量在各处理及不同深度上差异不大, 降低约为 0.316~0.925 MPa; 水分从叶片汽化扩散到大气中, 其能量降低达 39.072~86.062 MPa。说明水流在该地区土壤—叶片—大气连续体中运移时, 其能量主要消耗在由叶片到大气这个环节上。

表 5 灌水周期内 SPAC 中各部分能量值

MPa

日期 (月-日)	ψ_m			ψ_L			ψ_a
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	
07-20	-0.00563	-0.0096	-0.0146	-0.34	-0.45	-0.54	-40.003
07-21	-0.01246	-0.0233	-0.0247	-0.43	-0.49	-0.57	-81.630
07-22	-0.0143	-0.0362	-0.0288	-0.48	-0.51	-0.63	-86.664
07-23	-0.0168	-0.0715	-0.0552	-0.53	-0.61	-0.76	-65.310
07-24	-0.0236	-0.1123	-0.0913	-0.60	-0.68	-0.78	-46.799
07-25	-0.0265	-0.1297	-0.0971	-0.62	-0.71	-0.79	-60.007
07-26	-0.0342	-0.162	-0.1053	-0.77	-0.91	-0.93	-73.016

3.4 葡萄园 SPAC 系统水流阻力分布规律

由表 6 可知, 各水分处理刚灌水后, 土壤水分含量较大, 土壤水势高, 因此土壤阻力值相对很小; 随着灌水时间的延长, 土壤水势迅速降低, 而土壤阻力迅速增大, 土壤阻力的最大值是最小值的 1 425.7 倍。葡萄植株体内的水流阻力既受土壤水势、叶片水势的影响, 同时还受到叶片蒸腾速率和土壤阻力的影响,

从葡萄成熟初期一个灌水周期看, 葡萄植株体内水流阻力最大值是最小值的 3.1 倍, 而葡萄叶—气系统水流阻力的最大值是最小值的 3.5 倍。由此可看出: 在极端干旱区砂壤土质地下土壤—葡萄—大气连续体中各水流阻力的变化中, 土壤阻力的变化最大, 植株体内水流阻力的变化最小。

表 6 土壤—叶片—大气连续体中的水流阻力

Pa/(W · m²)

日期 (月-日)	土壤阻力			植物体阻力			叶—气系统阻力		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
07-20	2.0×10 ⁻⁷	8.0×10 ⁻⁷	2.4×10 ⁻⁶	0.64×10 ⁵	0.98×10 ⁵	1.1×10 ⁵	0.7×10 ⁷	0.8×10 ⁷	0.8×10 ⁷
07-21	1.6×10 ⁻⁶	7.9×10 ⁻⁶	9.2×10 ⁻⁶	0.81×10 ⁵	1.1×10 ⁵	1.3×10 ⁵	1.6×10 ⁷	2.0×10 ⁷	1.9×10 ⁷
07-22	2.4×10 ⁻⁶	2.4×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻⁵	0.92×10 ⁵	1.2×10 ⁵	1.4×10 ⁵	1.7×10 ⁷	2.1×10 ⁷	2.0×10 ⁷
07-23	3.4×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁴	7.2×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁵	1.5×10 ⁵	1.9×10 ⁵	1.3×10 ⁷	1.8×10 ⁷	1.8×10 ⁷
07-24	8.0×10 ⁻⁶	4.0×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁵	1.8×10 ⁵	1.9×10 ⁵	1.2×10 ⁷	1.5×10 ⁷	1.3×10 ⁷
07-25	1.0×10 ⁻⁵	6.0×10 ⁻⁴	3.0×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁵	1.9×10 ⁵	2.2×10 ⁵	1.5×10 ⁷	1.9×10 ⁷	1.9×10 ⁷
07-26	2.1×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻³	4.0×10 ⁻⁴	1.9×10 ⁵	2.9×10 ⁵	2.9×10 ⁵	1.9×10 ⁷	2.8×10 ⁷	2.5×10 ⁷

在砂壤地葡萄土壤—叶片—大气连续体各水流阻力中, 叶—气系统水流阻力最大。占该连续体中水流总阻力的 98.8%~99.0%; 植株体内水流传输阻力次之, 占该连续体中水流总阻力的 1.0%~1.2%; 土壤阻力最小, 占该连续体中水流总阻力的比例小到可忽略不计。则决定葡萄 SPAC 系统中水流速率的决定因素是叶—气系统的水流阻力。

律的分析, 发现葡萄园 SPAC 系统水流阻力分布规律与气孔阻力变化规律明显。

4 结论

通过对葡萄园不同水分处理土壤水势、土壤含水量、叶水势等指标的测定与对该连续体水分运移过程中气孔阻力和水流阻力各主要分量的大小与变化规

(1) 各水分处理在灌水后均随着时间的推移, 蒸腾速率缓慢下降, 其中高水处理的蒸腾速率最大, 低水居中, 中水最低, 气孔阻力与蒸腾速率的变化趋势相反, 表现为随灌水时间的延伸而增大。

(2) 各水分处理气孔阻力随着叶水势的减小而增大, 呈显著负相关关系, 且在高水与中水处理中气孔阻力仅与 20 cm 土层以上与土壤水势极显著相关, 而低水处理气孔阻力与 20—30 cm 土层土壤水势极显著相关, 气孔阻力因不同的水分处理其影响深度不同。

(3) 葡萄园土壤—叶片—大气连续体中水分势能分布规律明显。在连续体中,土壤阻力的最大值约为最小值的 1 425.66 倍,植株体内水流阻力最大值是最小值的 3.08 倍,而葡萄叶—气系统水流阻力的最大值是最小值的 3.51 倍。在各水流阻力中,叶—气系统水流阻力最大,占该连续体中水流总阻力的 98.8%~99.0%,植株体内水流传输阻力次之,占该连续体中水流总阻力的 1.0%~1.2%,土壤阻力最小,占该连续体中水流总阻力的比例可忽略不计。

参考文献:

- [1] 冷石林,石培华. SPAC 水流阻力的确定[J]. 中国农业气象,1993,14(6):43-46.
- [2] 康绍忠. 土壤—植物—大气连续体水分传输动力学及其应用[J]. 力学与实践,1993,15(1):11-19.
- [3] 邵明安. 根木质部水流阻力 Poiseuille 公式计算值与实测值的差别[J]. 水利学报,1993(12):61-64.
- [4] 康绍忠,熊运章,王振镒. 土壤—植物—大气连续体水分运移力能关系的田间试验研究[J]. 水利学报,1990(7):1-9.
- [5] 景卫华,贾忠华,罗纳. 总水势概念的定义、计算及应用条件[J]. 农业工程学报,2008,24(2):27-31.
- [6] 郭庆荣,张秉刚,钟继洪,等. 南亚热带丘陵赤红壤—龙

眼—大气连续体水分运移力能变化及分布规律[J]. 生态科学,1993,4(3):260-266.

- [7] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤—植物—大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京:水力电力出版社,1994.
- [8] 张喜英,刘孟雨,雷玉平. 土壤—植物—大气连续体水分运移阻力的田间试验与模拟研究[J]. 中国农业气象,1995,16(2):33-36.
- [9] 徐军亮,马履一,王华田. 油松人工林 SPAC 水势梯度的时空变异[J]. 北京林业大学学报,2003,25(5):1-5.
- [10] 杨晓光. 夏玉米农田 SPAC 系统水分传输势能及其变化规律研究[J]. 中国生态农业学报,2003,11(1):27-29.
- [11] 康绍忠,刘晓明. 玉米生育期土壤—植物—大气连续体水流阻力与水势的分布[J]. 应用生态学报,1993,4(3):260-266.
- [12] 张斌,丁献文,张桃林,等. 干旱季节不同耕作制度下红壤—作物—大气连续体水流阻力变化规律[J]. 土壤学报,2001,38(1):17-24.
- [13] Van den Honert T H. Water transport in plants as a catenary process[J]. Discussions of the Favaday Soc., 1948,3:146-153.
- [14] Cowan I R. Transport of water in the soil—Plant—atmosphere system[J]. J. Apply Ecology,1965,2:221-239.

(上接第 179 页)

- [4] 杨晓晖,张克斌,慈龙骏. 半干旱农牧交错区近 20 年来景观格局时空变化分析:以内蒙古伊金霍洛旗为例[J]. 北京林业大学学报,2005,27(5):81-86.
- [5] 高小红,王一谋,杨国靖. 基于 RS 与 GIS 的榆林地区景观格局动态变化研究[J]. 水土保持学报,2004,18(1):168-171.
- [6] 张银辉,罗毅,刘纪远,等. 内蒙古河套灌区土地利用与景观格局变化研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1):61-65.
- [7] 吴波,慈龙骏. 毛乌素沙地景观格局变化研究[J]. 生态学报,2001,21(2):191-196.
- [8] 肖笃宁. 景观生态学理论方法与应用[M]. 北京:中国林业出版社,1991:92-98.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家

标准化管理委员会. GB/T21010—2007 土地利用现状分类(S).

- [10] Riitters K H, Neill R V O, Hunsaker C T. et al. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics[J]. Landscape Ecology,1995,10:23-39.
- [11] 李秀珍,布仁仓,常禹,等. 景观格局指标对不同景观格局的反应[J]. 生态学报,2004,24(1):123-134.
- [12] 张成梁,黄艺. 山西省煤矿区土地退化成因分析及生态恢复对策[J]. 农业环境科学学报,2006,25(增刊):711-715.
- [13] 徐跃通,杨燕杰,丁娟. 基于 GIS 和 RS 的煤矿区土地利用变化分析[J]. 矿业研究与开发,2009,29(3):35-37,46.
- [14] 卞正富,张燕平. 徐州煤矿区土地利用格局演变分析[J]. 地理学报,2006,61(4):349-358.

(上接第 184 页)

- [6] 赵其国,周炳中,杨浩,等. 中国耕地资源安全问题及相关对策思考[J]. 土壤,2002(6):293-302.
- [7] 张传华. 耕地生态安全评价研究:以重庆三峡库区为例[D]. 重庆:西南大学,2006.
- [8] 朱红波. 我国耕地资源生态安全的特征与影响因素分析[J]. 农业现代化研究,2008,29(2):194-197.

- [9] 朱红波. 我国耕地资源生态安全的时空差异研究[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(6):754-758.
- [10] 王军. 石家庄市耕地动态变化与生态安全评价研究[D]. 石家庄:河北师范大学,2009.
- [11] 汤洁,朱云峰,李昭阳,等. 东北农牧交错带土地生态环境安全指标体系的建立与综合评价:以镇赉县为例[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(1):119-124.