

WEPP 模型在紫色土区域适用性研究

朱韵娇 (河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要 利用紫色土区域某水保站 1984—2017 年 7 次典型降雨资料,应用 WEPP(water erosion prediction project)模型模拟了不同降雨条件下不同地面坡度的紫色土坡面径流量和侵蚀量,提出了模型评价方法,将模拟值与实测值进行比较,验证 WEPP 模型及其内置参数在我国紫色土范围内模型预测的可行性及准确性。结果表明,WEPP 模型对于紫色土区域水蚀模拟基本可行,产流量的预测比侵蚀量的预测更为合理,低坡度条件下的模拟结果优于高坡度条件。对于侵蚀量的模拟不够理想,高坡度条件下反而模拟较好。对于不同坡度下的侵蚀量进行相关分析,结果表明坡度是影响土壤侵蚀的动力因子,在一定的坡度范围内,随着坡度的增加,土壤侵蚀量与坡度呈幂函数递增关系。

关键词 土壤侵蚀量;产流量;坡度;降雨量;WEPP 模型
中图分类号 S157.1 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)23-0106-03

Research on the Applicability of WEPP Model in Purple Soil Area

ZHU Yun-jiao (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098)

Abstract Based on the 7 typical rainfall data from 1984 to 2017 in a soil and water conservation station in the particular purple soil area , the WEPP (water erosion prediction project) model was used to simulate the runoff and erosion amount of the purple soil slope under different rainfall conditions. The simulation method was compared with the measured values to verify the feasibility and accuracy of the WEPP model and its built-in parameters in the model of purple soil in China. The results showed that the WEPP model was basically feasible for the water erosion simulation in the purple soil area, and the prediction of the runoff was more reasonable than the prediction of the erosion amount, and the simulation result under the low slope condition was better than the high slope condition. The results showed that the slope was the dynamic factor that affected the soil erosion. In this slope range, the soil erosion and the slope were increasing with the increase of the slope.

Key words Soil erosion;Runoff;Slope;Rainfall;WEPP model

WEPP(water erosion prediction project)模型是美国农业部(USDA)为了克服通用土壤流失方程(USLE)的缺点而发布的一种基于连续事件的分布式参数土壤侵蚀预报模型,是迄今为止最为复杂的描述与土壤侵蚀相关物理过程的计算机程序。自 1985 年开发以来,WEPP 模型历经多次修改,最新模型由 2012 年推出。模型参数包括气候、坡度、土壤、作物管理 4 个参数模块。在模型开发过程中,先后采集了 1 800 个土壤样本,收集了全美近 30 年的气候资料。近年来,我国越来越多的学者利用 WEPP 模型对不同地区的土壤侵蚀进行模拟。笔者利用 WEPP 模型对紫色土区域某水土保持试验站产流、侵蚀数据进行模拟,评价该模型在我国紫色土区域的适用性,并分析了坡度单因子对侵蚀量的影响。

1 试验地概况

试验坡面位于四川某紫色土重点监测区的水土保持试验站。该研究采用 5°、10°、15°、20°、25° 5 个不同坡度的坡面,采用相同的耕作措施,通过量水池和三角堰进行径流和侵蚀的观测。5 个坡面相邻,不考虑其他因素的干扰,可以认为每次观测前土壤级配、前期含水量、土壤容重、集雨面积等初始条件基本一致。水土保持试验站设有一个雨量站,进行降雨量观测。

1984 年至今,观测了该水土保持试验站近 50 场降雨(雨量较大,发生了侵蚀现象)的降雨量、不同坡面的径流量、侵蚀量等。其中 7 场典型降雨情况见表 1。每场降雨选自不同年份,同一坡面上不同年份之间的耕作措施可能不同,植被覆盖度也不同。但是同一年份中,不同坡面的耕作措施和植

被覆盖度保持一致,土壤侵蚀量与坡度的实测值见表 1,径流量与坡度的实测值见表 2。

表 1 不同降雨量下坡度与土壤侵蚀量的关系
Table 1 The relationship between slope and the amount of soil loss in different amount of rainfall t/km²

坡度 Slope//°	降雨量 Rainfall//mm						
	102.4	70.7	169.4	79.0	154.5	72.7	144.6
5	10.5	12.5	169.6	32.4	152.8	107.0	21.4
10	26.0	351.7	453.2	41.2	263.5	170.0	47.5
15	35.5	352.0	561.2	78.2	497.6	308.0	135.4
20	34.5	480.0	861.3	91.5	521.3	429.0	197.5
25	40.5	570.0	1 287.5	109.8	589.4	834.0	246.3

表 2 不同降雨量下坡度与径流量的关系
Table 2 The relationship between slope and the amount of runoff variation in different amount of rainfall mm

坡度 Slope//°	降雨量 Rainfall//mm						
	102.4	70.7	169.4	79.0	154.5	72.7	144.6
5	16.01	12.45	26.05	23.13	31.12	22.30	20.22
10	14.86	23.66	34.24	24.28	31.87	23.34	21.50
15	15.82	29.37	35.74	25.24	32.69	24.29	22.44
20	20.26	32.23	38.00	25.81	33.20	25.17	25.15
25	21.12	15.29	39.43	26.73	33.50	26.14	31.48

2 WEPP 模型建立

2.1 预测参数建立 坡面版 WEPP 模型的预测参数包括气候参数、地形参数、土壤参数和土地管理参数。

2.1.1 地形参数。地形参数由手动直接输入不同坡降百分比,在该研究中采用 8.74%(5°)、17.63%(10°)、26.79%(15°)、36.40%(20°)、46.63%(25°)5 组不同坡度。每个坡度都是宽 7.00 m,长 9.52 m,土壤为紫色土。

2.1.2 气候参数。 缪驰远等^[1]在四川省遂宁市的紫色土区域运用 WEPP 模型对当地紫色土进行单次降雨土壤侵蚀预测时,发现利用 CLIGEN 气候生成器或 BackPoint DATA 断点生成器生成气候参数,预测结果均可达到显著水平。在模拟产流方面使用 CLIGEN 气候生成器的预测结果不及 Back-Point DATA 断点生成器好。何丙辉等^[2]利用四川省遂宁水土保持站降水年平均资料和气温的月平均资料与全美各参证站数据进行对比,对 CLIGEN 气候生成器模型进行了适应性评估。结果证明,选择 TEXAS 州 CENTEVILLE 站点为参证站点比较接近四川遂宁紫色土区域的模拟结果。因此,笔者结合实际情况,利用站内气象观测场中的降雨观测数据和参证站点美国得克萨斯州 (TEXAS) 森特维尔 (CENTERVILLE) 进行剩余气候数据的替代建立气候参数。

2.1.3 土壤参数。 土壤数据利用紫色土实测值及模型提供的经验公式生成土壤数据文件。

2.1.4 土地管理参数。 土地管理参数利用 WEPP 模型自带的多种参数,对 FALLOW、GRASS、FARMLAND 等多种情况进行模拟,选择拟合度较高的模式。

2.2 模型评价方法 试验利用统计学中相对误差 (E_r)、模型有效系数 (ME) 2 个衡量指标,对实际观测的产流量和产沙量值与 WEPP 模型中模型自动生成 2 种方式下所获取的预测值进行对比分析,分析模型的有效性^[3]。

$$E_r = \frac{Y_{\text{pred}} - Y_{\text{obs}}}{Y_{\text{obs}}} \times 100\%$$
$$\text{ME} = 1 - \frac{\sum (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{pred}})^2}{\sum (Y_{\text{obs}} - Y_{\text{mean}})^2}$$

式中, E_r 为相对误差, Y_{obs} 为实测值, Y_{pred} 为模拟值, Y_{mean} 为实测值的平均值,ME 为模拟有效性系数。

ME

{

= 1.0,模拟值与实测值均相等

>0.5,模型的模拟拟合较好

=0,实测值的平均值和模型的模拟值对实测值具有相同的相关性

>0,表示实测值的平均值对实测值的相关性要高于模型的模拟值

}

3 结果与分析

3.1 模型评价结果 由表 3 可知,WEPP 模型预测 5°、10°、15°、20°、25° 小区产流量的相对误差分别在 -24.92% ~ 32.21%、-12.99% ~ 7.04%、-16.24% ~ 14.93%、-15.63% ~ 25.41%、-9.55% ~ 33.43%,说明随着坡度的上升,产流量预测值的相对误差逐渐增大,25°时径流小区出现难以预测的情况。对于侵蚀量的预测,5°、10°、15°、20°、25°小区侵蚀量的相对误差分别在 -55.33% ~ -40.65%、-71.36% ~ 59.35%、-72.67% ~ -27.78%、-31.96% ~ 13.97%、-41.59% ~ 94.72%,说明 5 个不同坡度的径流小区的预测值不好,在 5°、10°、15°等低坡度条件下侵蚀量模拟值一般小于实测值,相对误差为负。在较高坡度时,误差呈现不确定性,其中在 25°坡度,相对误差可达 70% 以上,基本难以模拟出来。在相同参数组合的模拟下,产流量预测值的相对误差值一般小于侵蚀量的相对误差值,这说明在我国紫色土区域,单次降雨侵蚀产流量的预测效果要优于对产沙量的预测效果。这与代华龙等^[4]、李振林等^[5]的研究结果一致。

表 3 单次降雨侵蚀产流量、侵蚀量实测值与预测值结果
Table 3 Simulated and test results of the amount of runoff and soil erosion in single rainfall event

坡度 Slope/°	降雨量 Rainoff mm	产流量实测值 Test results of the amount of runoff/t/km ²	产流量预测值 Simulated results of the amount of runoff/t/km ²	相对误差 Relative error/%	侵蚀量实测值 Test results of the amount of soil erosion/t/km ²	侵蚀量预测值 Simulated results of the amount of soil erosion/t/km ²	相对误差 Relative error/%
5	102.4	16.01	12.02	-24.92	10.5	5.4	-48.57
	70.7	12.45	16.46	32.21	121.5	67.2	-44.69
	169.4	26.05	28.37	8.91	169.0	92.1	-45.50
	79.0	23.13	22.76	-1.60	32.4	18.6	-42.59
	154.5	31.12	28.68	-7.84	152.8	79.3	-48.10
	72.7	22.30	23.40	4.93	107.0	47.8	-55.33
	144.6	20.22	19.80	-2.08	21.4	12.7	-40.65
	102.4	14.86	13.18	-11.30	26.0	9.7	-62.69
10	70.7	23.66	20.59	-12.99	351.7	138.5	-60.62
	169.4	34.24	31.15	-9.03	453.2	169.7	-62.56
	79.0	24.28	23.50	-3.23	41.2	11.8	-71.36
	154.5	31.87	30.45	-4.45	263.5	107.1	-59.35
	72.7	23.34	24.98	7.04	170.0	51.2	-69.88
	144.6	21.50	21.02	-2.25	47.5	15.5	-67.37
	102.4	15.82	14.89	-5.86	35.5	12.9	-63.66
	70.7	29.37	24.60	-16.24	352.0	254.2	-27.78
15	169.4	35.74	35.60	-0.38	561.2	315.6	-43.76
	79.0	25.24	25.61	1.47	78.2	31.1	-60.23
	154.5	32.69	34.78	6.39	497.6	242.8	-51.21
	72.7	24.29	27.92	14.93	308.0	119.1	-61.33
	144.6	22.44	24.23	7.96	135.4	37.0	-72.67

接下表

续表 3							
坡度 Slope//°	降雨量 Rainoff mm	产流量实测值 Test results of the amount of runoff//t/km ²	产流量预测值 Simulated results of the amount of runoff//t/km ²	相对误差 Relative error//%	侵蚀量实测值 Test results of the amount of soil erosion//t/km ²	侵蚀量预测值 Simulated results of the amount of soil erosion//t/km ²	相对误差 Relative error//%
20	102.4	20.26	17.50	-13.64	34.5	27.7	-19.71
	70.7	32.23	27.19	-15.63	480.0	522.1	8.77
	169.4	38.00	42.50	11.84	861.3	794.9	-7.71
	79.0	25.81	30.10	16.62	91.5	79.2	-13.44
	154.5	33.20	40.27	21.29	521.3	497.3	-4.60
	72.7	25.17	31.56	25.41	429.0	291.9	-31.96
	144.6	25.15	29.79	18.45	197.5	225.1	13.97
25	102.4	21.12	19.10	-9.55	40.5	63.3	56.30
	70.7	15.29	0	—	570.0	0	—
	169.4	39.43	45.34	14.99	1 287.5	1 130.7	-12.18
	79.0	26.73	34.11	27.61	109.8	189.8	72.86
	154.5	33.50	44.70	33.43	589.4	727.0	23.35
	72.7	26.14	34.52	32.08	834.0	487.1	-41.59
	144.6	31.48	33.58	6.66	246.3	479.6	94.72

注:相对误差为负值代表预测值小于实际观测值
Note:The negative relative errors mean that the simulated results was less than the actual test results

由表 4 可知,在 5°、10°、15°低坡度条件下,产流量的模型有效性 ME 值均大于 0.800,而侵蚀量的模型有效性 ME 值在 0.023~0.299,表明紫色土低坡度条件下,WEPP 模型对产流量的预测效果要优于对侵蚀量的预测效果。在 20°、25°高坡度条件下,WEPP 模型预测结果与低坡度条件下相差较大,其侵蚀量的模型有效性 ME 值反而大于 0.700,明显高于产流量的模型有效性 ME 值。表明高坡度条件下 WEPP 模型对紫色土区域侵蚀量预测较好。在 25°条件下,对产流量的模型有效性 ME 值表现为负值,这说明此时对实测值的关联性均高于模型的模拟值。

表 4 WEPP 模型 ME 评价结果

Table 4 ME evaluation results of WEPP model		
坡度 Slope//°	产流量 Runoff yield	侵蚀量 Erosion yield
5	0.805	0.299
10	0.892	0.023
15	0.835	0.279
20	0.177	0.947
25	-0.366	0.739

3.2 坡度与侵蚀量的关系 对坡面水蚀来说,地面坡度是地形因素中对坡面土壤侵蚀的发展起重要作用的因子。一般认为,坡度的大小决定径流的冲刷与搬运能力。与此同时,地面坡度的大小影响降雨入渗量、地表径流量、地表滞水能力和侵蚀泥沙的稳定性,从而直接或间接地影响土壤侵蚀。根据现有研究成果,坡度与土壤侵蚀量的关系多呈 $Y = a\theta^b$ 的关系(a 、 b 为常数)^[6]。土壤侵蚀量实测值幂函数拟合结果见表 5。

根据测算,不同降雨量情况下坡度指数也基本在 0.14~2.25,去掉 2 个极限值,指数在 0.80~1.60,且相关系数也较大,除了降雨量 70.7 mm,其他 6 组数据 R^2 均大于 0.900 0,说明在一定的坡度范围内,该流域的土壤侵蚀量与坡度的关系满足幂函数关系。

表 5 不同降雨量下坡度与土壤侵蚀量幂函数拟合结果

Table 5 The fitting results of power function between slope and the amount of soil loss in different amount of rainfall			
降雨量 Rainoff//mm	a	b	模型相关系数 Correlation coefficient(R^2)
102.4	3.264 4	0.818 6	0.908 0
70.7	0.647 2	2.255 3	0.807 8
169.4	25.466 0	1.193 0	0.980 1
79.0	8.051 5	0.805 7	0.939 3
154.5	37.310 0	0.884 5	0.959 9
72.7	12.800 0	1.213 8	0.932 7
144.6	1.493 5	1.606 5	0.977 2

由表 6 可知,总体来说,不同降雨条件下,随着坡度的增大,土壤侵蚀量也随之增加,但是坡度每增加相同的度数,土壤侵蚀量的增加幅度有所不同,在试验坡度(5°~25°)范围内,土壤侵蚀增加量整体趋势随坡度的变陡而增加。坡度越陡,一定坡长上的坡面径流量就越少。地面坡度越大,径流的冲刷能力越强。坡度相同时,坡面越长,汇集的流量越大,侵蚀力也越强。

表 6 土壤侵蚀增量与坡度的变化

Table 6 The relationship between the additional amount of soil loss and slope							
坡度 Slope//°	降雨量 Rainfall//mm						
	102.4	70.7	169.4	79.0	154.5	72.7	144.6
5	15.5	339.2	283.6	32.4	110.7	63.0	26.1
10	9.5	0.3	108.0	41.2	234.1	138.0	87.9
15	-1.0	128.0	300.1	78.2	23.7	121.0	62.1
20	6.0	90.0	426.2	91.5	68.1	405.0	48.8
25	—	—	—	—	—	—	—

4 结论

WEPP 模型对于紫色土区域土壤侵蚀模拟基本可行,对于产流量的预测比侵蚀量的预测更为合理,低坡度条件下的模拟结果优于高坡度条件。对于侵蚀量的模拟不够理想,高坡度条件下反而模拟较为准确。对于不同坡度下侵蚀量进
(下转第 113 页)

系发达^[15],吸收能力强,因此短期内(即 1~2 年)不施 N、P、K 化肥对产量的影响暂时不明显,但若多年完全不施肥,将会导致养分缺乏,麻头收缩便难以恢复,产量下降幅度大。

2.1.5 产量分析。由表 4 可见,处理⑥即施 N 600 kg/hm²、P 750 kg/hm²、K 675 kg/hm² 的产量最高,为 108 400 kg/hm²,产量显著或极显著高于其他处理,该水平也是当时湛江垦区中老龄麻平均地力的施肥标准。但增施有机肥达到 45 000 kg/hm² 的情况下,其施肥标准可下调至: N(尿素) 450~525 kg/hm²、P(过磷酸钙) 600~675 kg/hm²、K(氯化钾) 450~525 kg/hm²。此外,处理③、⑭、⑩也获得较高产量,且处理间无显著差异,其产量显著或极显著高于处理②、④、⑤、⑦、⑧、⑨、⑪、⑫、⑬。

2.2 23-1 麻园“3414”试验 由表 7 可见,处理⑪即成龄麻施 N 450 kg/hm²、P 750 kg/hm²、K 450 kg/hm² 的产量最高,为 122 490 kg/hm²; 其次处理⑩即施 N 300kg/hm²、P 750 kg/hm²、K 675 kg/hm²,产量为 105 855 kg/hm²。则中龄麻前要确保 P、K 肥的投入。

表 7 23-1 麻园“3414”试验施肥水平与 3 年的平均产量结果
Table 7 Fertilization level and average yield in 3 years of “3414” fertilizer test in 23-1 sisal garden

处理 Treatment	区组 Block	N	P	K	产量 Yield//kg/hm ²
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	80 085
2	N ₀ P ₁ K ₂	0	750	450	104 340
3	N ₁ P ₁ K ₂	150	750	450	89 145
4	N ₂ P ₀ K ₂	300	0	450	84 225
5	N ₂ P ₁ K ₂	300	375	450	92 595
6	N ₂ P ₂ K ₂	300	750	450	93 795
7	N ₂ P ₃ K ₂	300	1125	450	81 855
8	N ₂ P ₂ K ₀	300	750	0	91 545
9	N ₂ P ₂ K ₁	300	750	225	101 175
10	N ₂ P ₂ K ₃	300	750	675	105 855
11	N ₃ P ₂ K ₂	450	750	450	122 490
12	N ₁ P ₁ K ₂	150	375	450	89 055
13	N ₁ P ₂ K ₁	150	750	225	93 315
14	N ₂ P ₁ K ₁	300	375	225	90 090

注:产量为 2012、2013、2014 年 3 年平均产量
Note:Data of yield was the mean of 2012-2014

3 结论与讨论

(1)NPK 平衡配比可获得高产,偏施 N 会抑制叶片 P 含量的提高,故不能偏施,以免影响养分平衡而不利产量提高,尤其幼龄麻抗斑马纹病能力下降,致该病暴发。因此,未开割麻相对控氮,以提高抗斑马纹病能力。

(上接第 108 页)

行相关分析,结果表明坡度是影响土壤侵蚀的动力因子,在一定的坡度范围内,随着坡度的增加,土壤侵蚀量与坡度呈幂函数递增关系。

参考文献

[1] 缪驰远,何丙辉,陈晓燕. 水蚀模型 USLE 与 WEPP 在紫色土水蚀预测中的应用对比研究[J]. 农业工程学报,2005,21(1):13-16.
[2] 何丙辉,缪驰远,陈晓燕,等. CLIGEN 气候生成器模型在紫色土地区的

(2) 试验检测发现,叶片 Mg 含量缺乏,施 Mg 肥可显著促进产量的提高。

(3) 试验结果表明,N、P、K 肥利用率低,N 肥 ≤ 25.08%、P 肥 ≤9.86%、K 肥 ≤22.52%,主要原因:①施肥较晚,很快入冬致旺长期短及施肥时土壤干旱,而影响吸收利用率的提高;②土壤酸性较强,而 P 肥(过磷酸钙)很大程度被土壤固定,也影响吸收利用率的提高,今后应考虑提高肥料利用率问题。

(4) 短期内经济施肥量为不施肥(空白),其短期内不施肥产量仍达到施肥水平的 87%。其主要原因是试验地长期注重配施 N、P、K 肥,并增施有机肥,因此养分比较充足,且剑麻为长期作物,根系非常发达,吸收能力极强,故短期内(即 1~2 年)不施肥对产量影响不明显,但不利于促进剑麻产量大幅度提高和培肥地力。

参考文献

[1] 黄标,张曼其,陈叶海,等. 剑麻营养诊断指导施肥技术的开发与应用[J]. 热带农业科学,2001(1):10-18.
[2] 许能琨,林苾,赵俊林. H·11648 麻对氮、磷、钾、钙、镁肥及其不同用量的反应[C]//中国热带作物学会剑麻专业委员会. 剑麻学术论文集. [出版地不详]:[出版者不详],1987:12-13.
[3] 黄标,符清华. H·11648 麻茎腐病发生规律及防治研究[J]. 热带作物研究,1990,41(3):38-45.
[4] 余让水,林苾,许能琨,等. H·11648 麻采样方法研究[J]. 中国麻作,1992(1):43-46.
[5] 林苾,许能琨,余让水,等. 几种钙肥对剑麻 H·11648 的肥效及用量[J]. 中国麻作,1990(2):37-39.
[6] 余让水,林苾,许能琨,等. 龙舌兰杂种 11648 号麻主要矿质营养缺乏症研究[J]. 中国麻作,1991(1):37-41.
[7] 裴超群,陶玉兰,黄强. 谈谈剑麻的施肥[C]//中国热带作物学会剑麻专业委员会. 剑麻学术论文集. [出版地不详]:[出版者不详],1988:34-37.
[8] 严宣传. 东方农场 H·11648 麻的平衡施肥[C]//中国热带作物学会剑麻专业委员会. 剑麻学术论文集. [出版地不详]:[出版者不详],1990:22-24.
[9] 林苾,余让水,许能琨. 广西两种植麻土壤五要素肥效试验报告[J]. 广西热作科技,1990(3):1-5.
[10] 林盛忠,黄仕英. 东一号麻肥料三要素追肥正交试验总结[J]. 热带作物研究,1989(4):30-37.
[11] 林盛忠. 从钾与钙的关系看叶片营养诊断与土壤营养诊断相结合的重要性[C]//中国热带作物学会剑麻专业委员会. 剑麻学术论文集. [出版地不详]:[出版者不详],1992:57-60.
[12] 许能琨,林苾,黄标,等. 剑麻茎腐病与营养施肥关系研究初报[J]. 热带作物研究,1991,43(1):66-71.
[13] 张少若. 热带作物营养与施肥[M]. 北京:中国农业出版社,1996:158-169.
[14] 马斯纳 H. 高等植物的矿质营养[M]. 曹一平,等译. 北京:北京农业大学出版社,1988:137-144.
[15] 李道和,谢思高,范运权,等. 剑麻[M]. 广州:广东科技出版社,1981:7-11.
[16] 杨荣,黄标,梁明,等. 剑麻种植生产专用机械的研制与应用推广[J]. 安徽农业科学,2015,43(34):6-9.

适应性研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):183-187.
[3] 何建林. WEPP 模型预测参数在紫色土区的研究[D]. 重庆:西南大学,2010.
[4] 代华龙,曹叔尤,刘兴年,等. 基于 WEPP 模型的紫色土坡面水蚀预报[J]. 中国水土保持科学,2008,6(2):60-65.
[5] 李振林,何丙辉,何建林,等. 紫色土区 WEPP 模型不同地类下预测参数敏感性分析[J]. 云南农业大学学报,2013,28(5):654-660.
[6] 刘淑燕,秦富仓,项元和,等. 基于 WEPP 模型进行坡度因子与侵蚀量关系研究[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(4):97-101.