

文章编号: 1000 0585(2001)05-0601-08

黄土丘陵沟壑区作物生产潜力影响因素分析 ——以王家沟流域为例

李忠武¹, 蔡强国¹, 唐政洪¹, 吴淑安¹, 朱远达²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 华中农业大学资源农化系, 武汉 430070)

摘要: 针对黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀非常严重、作物产量低而不稳以及农业生产水平低下的特点, 本文首先分析了近几年来王家沟流域不同种类和不同年份作物生产力变化的特征, 然后在地理信息系统 (GIS) 技术支持下, 利用基于土壤侵蚀条件下的 YIELD 作物生产力模型并结合各作物的实际观测资料, 从降雨量、气温等气象因素以及地膜覆盖、施肥、梯田等耕作措施两方面分析了该小流域作物生产力变化的原因, 结果表明在气象因素 (大气降水) 和土壤侵蚀的共同影响下, 土壤水分和养分的变化是影响该区域作物生产力变化的主要制约因素。

关 键 词: 黄土丘陵沟壑区; 地理信息系统; 王家沟流域

中图分类号: S127 **文献标识码:** A

王家沟流域属于晋西黄土丘陵沟壑区, 位于离石县城以北 4 公里, 为黄河一级支流三川河流域的一条支沟。总面积 9.1 平方公里, 涉及 5 个行政村, 7 个自然村。人口密度 178 人/km², 耕地面积 373.3 公顷, 属于暖温带半干旱气候区, 多年平均降水量 505mm, 年平均气温 9℃, 无霜期 160–200 天。该流域沟坡陡峭, 支离破碎, 沟壑纵横, 梁峁交错, 主沟长 5.6 公里, 平均宽 1.63 公里, 大小沟道 31 条, 沟壑密度 7.01km/km², 沟道比降 2.7%, 呈典型黄土丘陵沟壑地貌, 同时该区水土流失严重, 自然灾害频繁^[1]。由于气候、地形以及人为因素等多方面的影响, 造成当地的粮食产量低而不稳, 并直接影响当地经济的发展。故在对该流域粮食产量变化因素分析的基础上, 揭示出主要的影响因子, 从而可为小流域正确的农业决策提供一定的理论依据。

1 王家沟流域近年来粮食产量现状分析

王家沟流域种植的主要粮食作物有玉米、高粱、豆类、薯类和糜谷等。由于这几种作物自身的生物学特性与其生长发育规律的不同, 以及气候、降水条件的不稳定性, 造成该小流域粮食的年总产量和单产出现较大的差异^[2]。通过对 1991–1999 年的各类农作物产

收稿日期: 2001-06-17; 修订日期: 2001-08-20

基金项目: 科技部国家重点科技 (攻关) 项目 (95–019–01–01–01); 中国科学院西部行动项目 (KZCX1–10–04); 加拿大国际发展总署 (CIDA) 资助中国–加拿大合作项目 (SEM GIS II)

作者简介: 李忠武 (1972–), 男, 湖南长沙人, 博士研究生。主要从事精准农业及作物生产潜力的研究工作, 已发表论文 5 篇。

量进行实地调查，获得该流域 9 年的粮食单产以及总产量的变化情况 (图 1、图 2)。通过不同作物不同年份产量及总产量的方差分析 (表 1)，表明该流域作物产量的年际差异均比较大，对于单产来说，以玉米产量的变化最大，其次是高粱和薯类，其最大和最小年产量之差分别为 $5\,262\text{kg}/\text{hm}^2$ ， $4\,008\text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $3\,831.6\text{kg}/\text{hm}^2$ ，其方差变化也能体现同样的变化趋势，三种作物的方差分别为 $2\,476\,588$ ， $1\,449\,555$ 和 $1\,375\,127$ ，呈现极其明显的年际差异。而对于各年度的总产量来说，其变化更加显著，极大值与极小值之差达 $754\,040.35\text{kg}/\text{hm}^2$ 。因而总的来说王家沟流域作物产量的年际变化不论从单产还是从总产量来说均比较大。

表 1 不同作物产量情况分析

Tab 1 The analysis of different crop yields

| 作物 | 年平均 (kg/hm^2) | 最大 (kg/hm^2) | 最小 (kg/hm^2) | 极差 (kg/hm^2) | 方差 |
|-----|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|
| 高粱 | 1 816. 35 | 4 159. 5 | 151. 5 | 4 008 | 1 449 555 |
| 玉米 | 3 851. 95 | 5 752. 5 | 490. 5 | 5 262 | 2 476 588 |
| 豆类 | 644. 73 | 1 213. 5 | 34. 5 | 1 179 | 137 934. 2 |
| 糜谷 | 1 796. 72 | 2 551. 65 | 193. 5 | 2 358. 15 | 640 811. 1 |
| 薯类 | 2 399. 88 | 3 937. 95 | 106. 35 | 3 831. 6 | 1 375 127 |
| 总产量 | 473 999. 6 | 808 645. 3 | 54 604. 95 | 754 040. 35 | 7. 03E+ 10 |

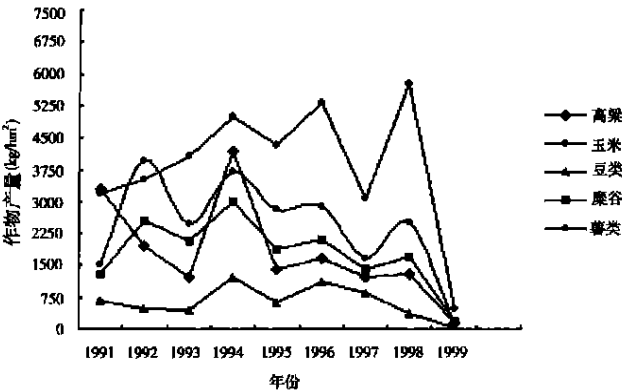


图 1 不同年份不同作物产量

Fig. 1 Crop yield in different years

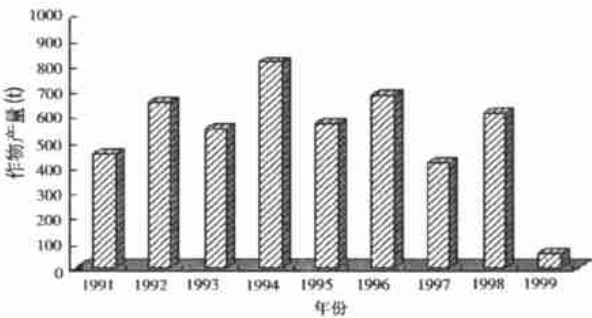


图 2 不同年份作物总产量

Fig. 2 Gross crop yield in different years

2 作物产量的影响因素分析

2.1 YIELD 模型

作物生产力模型是指在计算机的帮助下, 用数学方法来描述作物生长的动力过程, 是分析作物生长机理及其与作物生长环境之间关系的一项重要手段。最早的作物模型是 60 年代建立的在大棚中估价光拦截作用和光合作用的模型^[3], 从那时起, 经过 30 多年的研究, 已发展了种类繁多、目的多样的多种作物生长模型^[4], 但由于模型本身的限制性, 真正普适性的模型很少; 同时对于世界上的大部分地区来讲, 土壤侵蚀均是限制作物生产力正常发挥的制约因素^[5], 而在众多的作物生产力模型中都没有考虑侵蚀因素对生产力的影响。YIELD 模型是由加拿大国际发展署资助的中加合作项目——黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀管理信息系统 (SEMGIS) 的一部分^[6], 是由 Hayes 等研究开发^[7], 中国科学院地理科学与资源研究所和加拿大多伦多大学针对黄土丘陵沟壑区的实际情况而进行修正的; 该模型自 1992 年以来, 历时 8 年, 经过反复修正, 以求适应黄土丘陵区脆弱生态条件^[8]。该模型可以用来研究黄土丘陵沟壑区的作物产量和气候、耕作以及水土保持措施之间的关系, 是一个基于地块和 GIS 的, 由日气象信息以及流域的土壤、地形和作物水分参数驱动模型, 集中研究了作物产量与气象及土壤水分条件的关系。同时由于研究区属于干旱——半干旱地区, 每年的降水在 300~500mm 左右, 且降雨的时间分布极不均匀, 故对于该地区的作物生长来说, 作物的水分供求成为一个十分突出的问题。针对黄土高原农业发展的严重缺水问题, YIELD 模型中特别强调通过各种作物管理措施来提高农作物对土壤水分的利用效率。

模型运行所需的输入文件及参数:

1. 气象文件包括日期、平均温度、平均湿度、最小湿度、云量、白天和夜间风速等参数;
2. 降水文件包括日期、降雨量、降雨历时参数;
3. 地块文件包括地块号、地块面积、高程、平均坡度坡向、土地类型、土壤类型等参数;
4. 作物文件包括地块号、作物种类、所占面积百分比;
5. 参数文件包括所模拟区域的名称、经纬度、模拟年限、作物参数 (各生长期长度、总生长天数、作物根生长率)、土壤参数 (地下水位深度、土壤水文参数、不同地块持水率、土壤结皮因素)

模型运行过程: 在作物栽培之前, YIELD 模型先对每一种作物类型估计一个栽培日期, 然后 YIELD 模型通过与作物生长和水力学的联系, 控制和监测作物每一天的生长过程, 最后经过对整个生长季节的模拟, YIELD 模型即可在一定的气温、降雨、太阳辐射以及播种日期条件下, 首先计算出一标准作物的生产量, 然后利用一系列次模型对不同的作物根据 ET、地形、气候条件进行修正, 即可得到不同作物的潜在产量和实际产量。

2.2 地理信息系统 (GIS) 在 YIELD 模型中的应用

作物模型自本世纪 60 年代产生以来, 在世界上已出现了众多的类型, 然而能在实际的农业生产中应用的类型很少, 并且往往是一地建立的模型不能在另一地使用, 造成模型

的普适性能很低。而目前正日新月异的地理信息系统 (GIS), 具有强大的对空间数据进行储存、处理、分析和可视化能力, 其出现虽已有 30 多年的历史, 但真正被用于农业和自然资源管理还只有 10 多年的时间, 并且 GIS 也可以将时间作为第四维空间进行考虑, 把基于机理过程的作物生长模型 (即随时间而发生的变化) 结合进来, 解决作物模型普适性不强的问题, 这将有利于对作物生长过程中的时间和空间变量进行分析, 以求建立普适的作物生产力模型。在本研究中我们利用 GIS 的 ARC/INFO 和 IDRISIW 软件, 建立小流域的图形数据库和属性数据库, 然后从中提取出小流域的地块文件 (图 3), 输入 YIELD 模型进行作物生产潜力的模拟, 所得地块的产量模拟结果又可以通过 GIS 在地图上显示出来, 以达到可视化的效果。

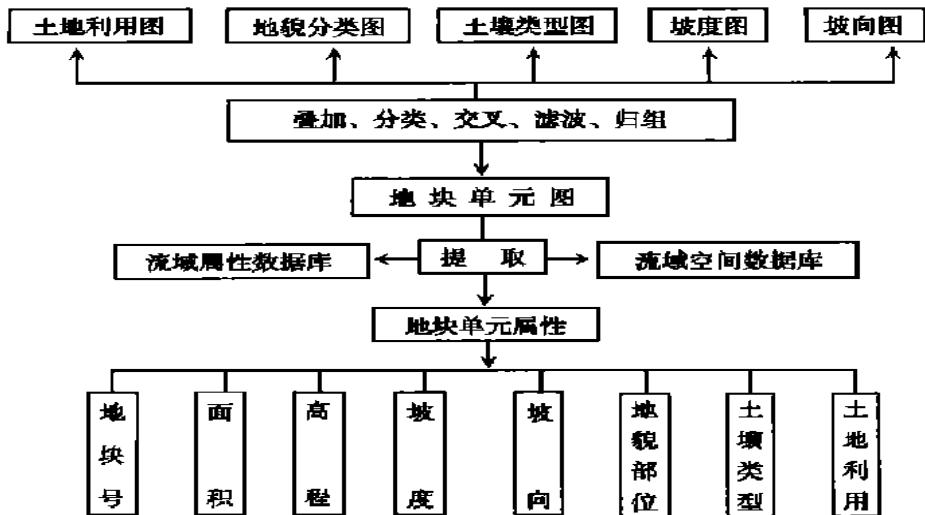


图 3 数据库和地块文件的生成流程图

Fig. 3 Flow chart of data base and land unit file producing

2.3 结果分析

2.3.1 降水对作物产量的影响

降水是影响作物生长发育的重要因素, 是土壤水分的主要来源, 对于黄土丘陵沟壑区的坡耕地来说, 由于地下水位较深, 降水对土壤水分的影响更大, 而土壤水分与作物生产力的关系非常密切, 故降水对于作物生产力的发挥也就有着重要的影响^[4]。黄土丘陵沟壑区属于温带季风气候区, 降水量的年际变化比较大, 这在气象站实测的雨量资料中也可看出; 而 YIELD 模型主要是针对黄土丘陵沟壑区降水量少而且变率大的问题而设计, 故该模型也能比较好地反映降水量的变化与作物产量的关系。根据对 1991-1999 共 9 年的气象资料分析可以知道 9 年的降水量变化在 300~600mm 之间 (表 2), 其中 7、8 月份降水占年降水量的 50% 以上, 年内分布极度不均, 尤其表现为年降水量越少, 其均匀度就越低, 而作物产量的变化与降水量的多少紧密相关, 从 YIELD 模拟产量来看 (以土豆为例), 1992 降水量比较充足, 故各地块平均产量也较高, 达到 13 806.09kg/hm², 1999 年降水少, 产量即锐减为 7 015.78kg/hm²; 从该流域各类作物单产和总产量的资料来看也有同样的趋势, 如 1999 年降水量仅为 312.8mm, 因而作物单产和总产量都远低于其他年

度(图 1、2)。当然, 由于降水季节分布的不均匀性、作物不同生长阶段对水分的需求差异性以及土壤——作物——水分系统 (SPAC) 相互影响的复杂性^[9], 同时由于 YIELD 模型主要针对作物生长期土壤水分状况, 因而使得有的年份降水量和作物产量之间的关系有一定的偏差, 如 1991 年和 1996 年的降水量和作物产量。

表 2 不同年份降水量和模拟土豆产量比较

Tab 2 The comparison of simulated potato yield and precipitation in different years

| 年份 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 |
|-------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| 降水量 (mm) | 331. 2 | 540. 8 | 392. 9 | 488. 5 | 504. 1 | 589. 6 | 505. 8 | 351. 9 | 312. 8 |
| 模拟产量 (kg/hm ²) | 13 602. 97 | 13 806. 09 | 10 178. 3 | 9 865. 59 | 8 722. 62 | 8 822. 92 | 10 404. 69 | 11 885. 68 | 7 015. 78 |

2. 3. 2 温度条件对作物产量的影响

温度是影响作物生长发育的关键所在, 若某一时间段的平均温度或积温过低, 一些作物就不能在播种季节下种, 或即使下种也不能正常生长获取产量。4、5 月份是作物播种和生长发育的初期, 对产量的形成具有关键的作用, 以 1992~ 1994 三年的气温资料为例, 对其月均温和月最低温进行分析可知 (图 3), 1993 和 1994 年 1~ 5 月份, 尤其是 4、5 月份温度低于 1992 年, 尤以 1994 年温度为低, 而 YIELD 模型对温度的反应非常敏感, 故在作物产量的模拟过程中, 对温度敏感的作物没有显示模拟结果或产量显著减低, 如 1993、1994 年由于温度原因对玉米、大豆和高粱的产量模拟就没有实现, 土豆产量也明显低于 1992 年 (表 2)。而在实际的生产中, 尽管前期温度较低, 作物难以生长, 但可以推迟播种日期, 并也能获得一定的产量, 若后期降水比较充足, 所获得的作物产量还会较好, 故在观测资料中, 1994 年作物产量反而高于 1992 年。

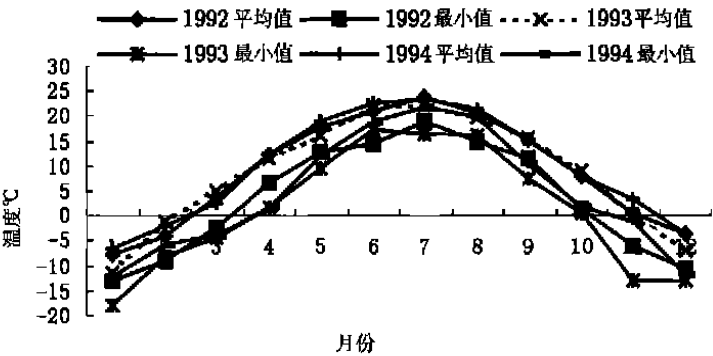


图 4 不同年份最低和平均气温比较

Fig. 4 Comparison of mean and minimum temperature in different years

2. 3. 3 耕作措施对作物产量的影响

(1) 施肥

王家沟流域经过 30 多年的治理, 目前仍有 86. 54hm²坡耕地坡旱地在继续耕种, 同时还有部分低标准梯田, 故农耕地的水土流失非常严重, 这造成该流域的土壤养分非常贫

瘠。通过对该流域农田土壤养分的测定, 0 ~ 20cm 土壤 中有机质含量为 0.249 4~ 1.321 1% (平均 0.6% 左右), 全氮含量为 0.028 2~ 0.078 5%, 全磷含量为 0.048 4~ 0.079 9%。根据全国土壤养分级别的划分标准, 该流域有机质含量大于 0.7% 的高产农田仅占 13.7%, 而 0.6% 以下的中低产田占农田总面积的 86.3%^[10]。土壤养分水平的高低与作物产量的关系非常密切, 观测资料表明, 高养分农田作物产量水平为 3 750kg/hm²以上, 中养分为 2 250~ 3 750kg/hm², 低养分的小于 2 250kg/hm²。故肥料的应用对于当地作物产量的提高具有关键的作用。通过基于 GIS 的作物模型对作物产量的模拟表明肥料的应用可以大幅度提高作物产量, 如 1992 年没有施肥时, 10 个地块平均玉米产量为 1 890.42kg/hm², 而在施肥后, 模拟产量达到 3 685.93kg/hm², 产量提高近 95%; 同时通过农田观测资料也表明, 玉米产量在使用化肥后每公顷产量可以提高 1 640.1kg/hm², 增产率为 21.7% (表 3)。

表 3 不同作物施肥前后产量比较 (kg/hm²)

| Tab 3 The yield comparison between before and after fertilization of different crops | | | | |
|--|---------|---------|---------|----------|
| 作 物 | 玉 米 | 高 粱 | 糜 谷 | 土 豆 |
| 无施肥 | 7 560.4 | 6 400.3 | 2 720.1 | 17 440.9 |
| 有施肥 | 9 200.5 | 7 960.4 | 3 640.2 | 22 804.0 |
| 增产率 | 21.7 | 24.4 | 33.8 | 30.7 |

资料来源: 杨才敏主编.《晋西黄土丘陵区水土流失综合治理开发研究》论文集, 北京: 科学技术研究所, 1995. 112~ 114

(2) 地膜覆盖

地膜覆盖可以有效地减少土壤水分的蒸发, 有利于蓄水保墒, 提高土壤水分的利用效率, 从而促进作物对水分的吸收及其生长发育, 因而成为黄土丘陵沟壑区以及干旱——半干旱地区一项重要的提高作物产量的耕作措施。据实测资料估计, 铺地膜前后的作物产量每公顷相差可达 4 500~ 6 000 公斤, 如河川、坝地玉米在铺地膜后产量可达 15 000kg/hm²。而通过作物模型的模拟可知, 地膜覆盖可大量增加作物产量, 地膜覆盖的模拟研究表明, 玉米产量比未采取任何措施前平均提高 1 653kg/hm² (表 4), 增加率高达 87.5%^[11]。这一措施应该成为王家沟流域提高粮食产量的重要途径之一。

表 4 不同耕作措施下模拟的作物产量 (kg/hm²)

| Tab 4 The simulating crop yield affected by tillage measure | | | | | |
|---|----|-------|---------|---------|---------|
| 地块号 | 作物 | 无措施 | 梯田 | 地膜 | 施肥 |
| 1 | 玉米 | 2 196 | 3 843 | 3 790.5 | 2 745 |
| 2 | 玉米 | 2 196 | 3 811.5 | 3 769.5 | 2 722.5 |
| 3 | 玉米 | 2 091 | 3 654 | 3 612 | 2 610 |
| 4 | 玉米 | 1 920 | 3 360 | 3 318 | 4 800 |
| 5 | 玉米 | 1 500 | 4 599 | 4 546.5 | 4 599 |
| 6 | 玉米 | 1 398 | 2 446.5 | 2 425.5 | 3 495 |
| 7 | 玉米 | 1 932 | 3 381 | 3 339 | 4 830 |

(3) 梯田

坡耕旱地由于地形坡度大而导致土壤养分和水分大量流失，引起作物缺水缺肥和生长发育不良，这是坡耕旱地作物产量低下的原因所在。将坡耕旱地改为梯田，使得农耕地形的坡度减小，从而减少土壤养分和水分的流失，提高土壤养分和水分的含量（表 5），对于作物产量有积极的促进作用。据观测资料表明，梯田的玉米产量比坡地大 750kg/hm²，其增产率达 25%^[12]，而模型模拟结果表明，将坡耕地改造为水平梯田后，其产量可达到 3 585kg/hm²，增产 89.7%。因而梯田的改造也不失为王家沟流域作物增产的措施之一。

表 5 王家沟流域梯田和坡耕地土壤养分及水分比较

| 项 目 | 有机质（%） | | | 全氮（%） | | | 碱解氮 | 有效磷 | 有效钾 | 水分 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|------|-------|------|
| | 最高 | 最低 | 平均 | 最高 | 最低 | 平均 | ppm | ppm | ppm | % |
| 坡地 | 0.648 7 | 0.249 4 | 0.416 3 | 0.047 7 | 0.031 0 | 0.036 7 | 20.2 | 5.0 | 11.3 | 4.02 |
| 梯田 | 1.321 1 | 0.330 1 | 0.550 0 | 0.075 8 | 0.032 2 | 0.044 0 | 35.4 | 10.5 | 133.8 | 5.30 |

资料来源：杨才敏主编.《晋西黄土丘陵区水土流失综合治理开发研究》论文集.北京：科学技术研究所，1995. 108~ 111

3 结 论

通过应用 YIELD 模型和地理信息系统技术并结合实际观测的气象和作物产量资料，对王家沟流域作物产量变化的各类因素进行了系统的分析，结果表明：在气象因素（大气降水）和土壤侵蚀的共同影响下，土壤水分和养分的变化是影响该区作物生产力变化的主要因素，而有效的耕作措施则是提高土壤水分和土壤养分水平的重要途径。所以今后农业决策方面应着重于采取有效的水土保持措施和农业耕作措施，以此来提高作物对土壤水分和土壤养分的利用效率，这样才能有助于小流域农业生产上一个新的台阶，实现黄土丘陵沟壑区农业的可持续发展。

参考文献：

[1] 蔡强国,王贵平,陈永宗.黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M].北京:科学出版社,1998.

[2] 李兆元,等.子午岭地区降水资源研究[J].地理研究,1992,11(3):89~ 92.

[3] Bowen H D, Colwick R F, Batchelder D G. Computer simulation of crop production: potential and hazards[J]. Agricultural Engineering, 1973, 54(10): 42~ 45.

[4] 刘建栋,等.冬小麦光合生产潜力数值模拟[J].地理研究,1998,17(1): 56~ 66.

[5] Follett R F, Stewart B A. Soil erosion and crop productivity[M]. American Society of Agronomy. Inc., Crop Science Society of America, Inc. Soil Science Society of America, Inc., Publishers Madison, Wisconsin, USA., 1985.

[6] 王福堂,蔡强国,陆兆熊.晋西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究[M].北京:科学出版社,1992.

[7] Hayes J, O'Rourke P, Terjung W, Todhunter P. YIELD: A numerical crop yield model of irrigated agriculture[J]. Publications in Climatology, 1982(35): 2.

[8] Li Zhongwu, Cai Qiangguo, Wang Hong. Developing eco agriculture of Hilly Loess region using AEGIS taking Langwogou catchment of Shanxi province as an example[A]. In: Zhao Chunjiang, ed. Process of Agricultural Information Technology[C]. Beijing: International Academic Publishers, 2000, 248~ 253.

- [9] 刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999, 42.
- [10] 杨淑婷, 冯彩平. 离石县粮食作物产量波动趋向及影响因素浅析[A]. 晋西黄土丘陵区水土流失综合治理开发研究论文集[C]. 北京: 科学技术研究所, 1995. 124~ 129.
- [11] 陈乃政, 苏乃平. 王家沟流域农田土壤养分现状及培肥途径[A]. 晋西黄土丘陵区水土流失综合治理开发研究论文集[C]. 北京: 科学技术研究所, 1995. 108~ 111.
- [12] 杨才敏, 陈乃政, 苏乃平. 高效生物复合肥应用试验初报[A]. 晋西黄土丘陵区水土流失综合治理开发研究论文集[C]. 北京: 科学技术研究所, 1995. 112~ 114.

Factors affecting crop productivity in loess hilly-gully area ——taking Wangjiagou watershed as an example

LI Zhong-wu¹, CAI Qiang-guo¹,

TANG Zheng-hong¹, WU Shu-an¹, ZHU Yuan-da²

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Department of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Crop productivity model research is an important means to study agricultural production, but the universally low adaptability of the model limited its popularization and application. Since Geographic Information System (GIS) owns powerful function of analyzing, processing, managing and visualizing spatial data, it has been widely used in agricultural production. The loess hilly-gully area is one of the most serious soil eroded areas in the world and serious soil erosion has made soil quality degrade and land productivity drop.

Aiming at characters of serious soil erosion and low and unstable crop productivity, this paper firstly introduces crop production of Wangjiagou watershed in recent ten years. Then, supported by GIS and aided with crop productivity mode YIELD model, combining actual observation data of crops, it analyzes reasons accountable for changes in agricultural production from two aspects of meteorologic factors (precipitation, temperature) and farming practices, mulching fertilizing and terracing. The result showed that changes of soil moisture and soil nutrient affected by precipitation and soil erosion are the main factors influencing changes in crop productivities. Effective tillage measures can greatly enhance level of soil water and soil nutrient and promote crop productivities.

Key words: loess hilly-gully area; geographic information system; Wangjiagou watershed