

# SWAT 模型在黄土丘陵区燕沟流域的应用研究

李星<sup>1</sup>, 徐学选<sup>2</sup>, 宇宙子<sup>1</sup>, 李波<sup>3</sup>, 赵娇娜<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学  
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 海南省环境科学研究所, 海南 海口 570206)

**摘要:** SWAT 是基于物理机制的分布式水文模型, 能够准确地模拟及预测不同下垫面的径流量。应用 SWAT 模型对黄土丘陵区燕沟流域 2002—2008 年逐月径流量进行了模拟。结果表明, 模拟率定期和验证期的 Nash—Sutcliffe 效率系数分别为 0.76 和 0.81, 相关系数  $r^2$  分别为 0.79 和 0.80。模型模拟精度高于评价标准(模拟效率  $Ens > 0.5$ ,  $r^2 > 0.6$ ), 说明 SWAT 模型适用于黄土丘陵区小流域, 模拟效果很好, 可以用来监测预报黄土丘陵区的汛情, 具有很强的实用性。

**关键词:** SWAT; 黄土丘陵区; 径流模拟

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)03-0141-04

中图分类号: S157.1

## Application of SWAT Model to Yangou Watershed in the Loess Hilly Area

LI Xing<sup>1</sup>, XU Xue-xuan<sup>2</sup>, YU Miao-zi<sup>1</sup>, Li Bo<sup>3</sup>, ZHAO Jiao-na<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou, Hainan 570206, China)

**Abstract:** SWAT(soil and water assessment tool), which is based on physical mechanisms, is a distributed hydrological model developed to simulate and predict runoff in different underlying surfaces accurately. The purpose of this study is to simulate the monthly runoff from Yangou Watershed in the loess hilly area from 2002 to 2008 by using SWAT model. Results indicated that the correlation coefficients in the period of calibration and validation were 0.96 and 0.98 with the Nash—Sutcliffe's coefficient being 0.89 and 0.76, respectively. The precision of SWAT simulation is higher than the evaluating criterion( $Ens > 0.5$ ,  $r^2 > 0.6$ ), which demonstrates that SWAT is applicable to simulate the runoff from Yangou Watershed and practical in flood monitoring and forecasting in the loess hilly area.

**Keywords:** SWAT; loess hilly area; runoff simulation

近 10 a 多年来国家对西部生态建设给予了高度重视, 实施了退耕还林还草工程, 目前已取得了巨大进展<sup>[1]</sup>, 然而由此产生的土地利用变化引起了该区水文水资源发生了变化。评价退耕还林草政策的环境效应, 需要对该区的变化环境的水文效应进行评估, 并提出对策。随着 RS, GIS 技术的迅速发展, 集成 DEM 技术的分布式流域水文模型研究已成为现代水文模拟研究的热点<sup>[2]</sup>, 是解决流域水文、生态和环境问题的一个有效的途径。

SWAT(soil and water assessment tool) 是由美国农业部研究中(USDA—ARS)开发的具有很强物理基础的分布式水文模型, 可用于具有多种土壤、土地利用、管理条件的复杂流域, 预测长期土地管理措

施对水、泥沙、污染物的影响<sup>[3]</sup>。SWAT 模型在美国、欧洲等地已得到了广泛应用, 并在加拿大、澳大利亚及亚洲等地区得到了普遍推广, 在发展过程中也得到了不断的改进, 如 ESWAT 是 Griensven 等<sup>[4]</sup>对 SWAT 模型的地表径流、河道汇流和水质组件的改进; SWATMOD 是 Sophocleous 等<sup>[5]</sup>对 SWAT 模型与 MODFLOW 模型改进并结合以更好地模拟地下水。SWAT—G 是 Eckhardt 等<sup>[6]</sup>在 SWAT 99.2 的基础上改进入渗和壤中流的计算方法以能更好地模拟山脚地带的水文过程。SWAT 模型在我国的应用始于 2000 年前后, 现已广泛应用于水沙和非点源污染模拟之中<sup>[7]</sup>。SWAT 模型在黑河<sup>[8]</sup>、三川<sup>[9]</sup>、汉江<sup>[10]</sup>、漳卫河<sup>[11]</sup>等大中流域的水量平衡模拟都取得

收稿日期: 2011-11-15

修回日期: 2012-01-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵区小流域大气降水—土壤水—地下水转化行为机理研究”(41171421)

作者简介: 李星(1986—), 男(汉族), 内蒙古巴彦淖尔市人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文与水土保持。E-mail: fengyun7365@126.com。

通信作者: 徐学选(1966—), 男(汉族), 研究员, 陕西省大荔县人, 主要研究方向为流域管理。E-mail: xuxue-xuan@nwsuaf.edu.cn。

了较好的结果,但 SWAT 模型在黄土高原地区的应用比较少,而且集中于陇西高原、山西高原以及渭河平原,如程磊等<sup>[12]</sup>、宋艳华等<sup>[13]</sup>、王海龙等<sup>[14]</sup>研究了 SWAT 模型在黄土高原的适用性,唐丽霞等<sup>[15]</sup>研究了土地利用和气候变化对流域径流泥沙的影响。本文将 SWAT 应用到黄土高原丘陵地区燕沟流域,进行了月径流模拟和水量平衡的研究,对模型在黄土区的应用具有借鉴意义。

## 1 模型产流原理及研究区概况

SWAT 模型的产流模拟不同于一般的统计模型,它具有很强的物理机制:气温控制降水形态、冰雪融化、蒸散发、地下径流补给等物理过程,并最终导致产流的变化。该模型采用 SCS 方法和 Green&Ampt 入渗方法计算地表径流<sup>[16]</sup>。在计算蒸散发时,考虑水面蒸发、裸地蒸发和植被蒸发,并分开模拟土壤水蒸发和植被蒸腾。潜在土壤蒸发由潜在蒸散发和叶面积指数估算,实际土壤蒸发用土壤厚度和含水量的指数关系式计算,植物蒸腾由潜在蒸散发和叶面积指数的线性关系式计算,并提供 3 种潜在蒸散发计算方法(Penman—Montieth 法、Priestley—Taylor 法、Hargreaves 法)供选择。壤中流采用动力贮水模型计算<sup>[17]</sup>,考虑了水力传导度、坡度和土壤含水量的时空变化。

燕沟流域位于陕西省延安市南 3 km 处,地理坐标为东经 109°20′00″—109°35′00″,北纬 36°20′00″—36°32′00″,属于黄土高原丘陵沟壑区第 II 副区。流域面积 47 km<sup>2</sup>,海拔 986~1 425 m。该区气候类型为暖温带半湿润干旱季风气候,多年平均气温 9.8 ℃,平均降水量约为 550 mm,其中 6—9 月降水量占全年降水量的 70%以上,且多以暴雨形式出现,全年蒸发量 900~1 000 mm,≥10 ℃积温 3 200 ℃,年无霜期 186 d,年均日照 2 445 h。流域内土壤以黄绵土为主,土壤结构为粉质壤土,抗蚀性差,水土流失严重,侵蚀模数达到 6 500 t/(km<sup>2</sup>·a)。流域地形起伏较大,坡度较陡,其中 25°以上坡地约占流域面积的 1/2,15°以下和 15°~25°坡地分别占流域的 23.4%和 27.6%。

## 2 研究方法

### 2.1 模型所需数据

模型的构建主要包括:DEM,土地利用图和土壤类型图(附图 2—3);气象数据包括日最高最低温、降雨量、风速、辐射等。土壤属性、植被属性、流域实测月径流量等均由流域多年实测所得(表 1)。由于我国普遍采用国际制的土壤粒径,使用时在 MATLAB 中应用 3 次样条插值法将土壤粒径由国际制转换为美国制<sup>[18]</sup>。

表 1 SWAT 模型主要输入数据及来源

数据类型	参数	数据来源
DEM	海拔高程、坡向、坡度、坡长	1:5 万数字化
土地利用类型图	叶面积指数、植被根深、曼宁系数、径流曲线数等	1:5 万数字化
土壤图	容重、饱和导水率、粒径、土壤水分状况	1:100 万数字
气象数据	日最高最低温、降雨、辐射、风速	延安市气象局

### 2.2 流域划分

本研究将流域划分为 11 个子流域,239 个 HRU (hydrologic response unit)。叠加土地利用和土壤类型图后输入模型所需测站和气象资料。采用 SCS 法计算地表径流,Penman—Montieth 法计算潜在蒸发,模拟 2002—2008 年燕沟流域逐月径流量。

### 2.3 参数敏感性分析与率定

利用 ArcSWAT 2005 自动敏感性分析模块,设置参数值采样间隔为 10,每次参数变化值为 0.05,将对径流有影响的 26 个参数进行了 280 次比较判断,根据灵敏度取值表(表 2)对参数进行选择获得对流域径流有重大影响的 6 个参数:CN2,ESCO,ALPHA\_BF,SOL\_AWC,SOL\_K,SLOPE,它们的灵敏度值分别为 2.84,0.81,0.70,0.34,0.25,0.24。

表 2 灵敏度取值

分类	因子值	灵敏度
I	<0.05	低
II	0.05~0.2	中
III	0.2~1.0	高
IV	>1.0	极高

利用燕沟 2002—2006 年实测月径流量对模拟的月径流量进行率定。首先对年平均值做校准,然后可以延伸至月、日记录,进行校准微调。根据“先调整水量平衡,再调整过程;先调整地表径流,再调整土壤水、蒸散发和地下径流”的原则<sup>[13]</sup>,本文将率定过程划分为 3 步。(1)水量平衡和总径流校准。根据模型自带的各种土地覆盖类型的 CN2 值,调整模拟的地表径流接近实测径流,调整 SOL\_AWC 和 ESCO

使模拟地表径流更接近实测值;调整模拟的地下径流值,如果模拟值偏高,则增加 GW\_REVAP,减小 REVAPMN;模拟值偏低,反之。(2)流量过程线的调整。若峰值看似合理但衰减期值降得太快,应调整基流系数和河道水力传导率 CH\_K;在融雪季节里,峰值会很高而衰退值很低;检查最大和最小积雪融

化速率 SMFMX 和 SMFMN,需要降低这些值。另外一个会影响积雪融化的参数是气温下降速率 TLAPS,需要增加这些值。最后,需要修改基流系数。(3)径流空间上的校准。校准径流应从流域上游的测站开始向下游逐步展开。率定的最终结果如表 3 所示。

表 3 参数敏感性等级和率定结果

等级	变量	参数名	输入文件	参数变化范围	参数最终值
1	CN2	CN2 值	*.mgt	-25%~25%	84
2	ESCO	土壤蒸发补偿系数	*.hru	0.00~1.00	1
3	ALPHA_BF	基流系数	*.gw	0.00~1.00	0.69
4	SOL_AWC	土壤可利用储水率	*.soil	0.00~1.00	0.29
5	SOL_K	土壤饱和和水力传导率	*.soi	-25%~25%	34
6	SLOPE	子流域平均坡度	*.hru	0~1	0.23

### 3 模型有效性检验

利用燕沟 2007—2008 年逐月径流量数据进行模型验证,采用 Nash—Sutcliffe 模拟效率系数 Ens,判断模拟径流量与实测径流量的拟合程度。Nash—Sutcliffe 越大,表明模拟效率越高。如果 Ens<0,说明模型模拟值比实测值可信度更低,表 4 为 Ens 作为径流模拟效率的评价标准。用相关系数 r<sup>2</sup> 验证可进一步评价数据的吻合度,r<sup>2</sup> 值在 Excel 中应用线性回归法求得。

表 4 Ens 的评价标准

等级	甲等	乙等	丙等
标准	>0.9	0.7~0.9	0.5~0.69

Nash—Sutcliffe 系数 Ens 的计算公式为:

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2}$$

式中:Q<sub>m</sub>——实测流量(m<sup>3</sup>/s);Q<sub>p</sub>——模拟流量(m<sup>3</sup>/s);Q<sub>avg</sub>——实测平均值(m<sup>3</sup>/s);n——实测数据个数。

通过模型验证后,对燕沟流域 2002—2008 年逐月径流量进行了模拟,分析燕沟流域月径流变化情况。使用 Nash—Sutcliffe 效率系数和相关系数 r<sup>2</sup> 对模拟和实测值进行计算,校准期和验证期的 Ens 分别为 0.76,0.81,相关系数 r<sup>2</sup> 分别为 0.79,0.80(表 5)。根据 Ens 的评价标准(表 4),SWAT 模型在燕沟流域的模拟达到了乙等标准,说明径流模拟值与实测值拟合度较好(图 1),得了较好的模拟计算成果。

表 5 模型验证结果

模拟期	评价目标	效率系数	相关系数
校准期(2002—2006 年)	月径流量	0.76	0.79
验证期(2007—2008 年)	月径流量	0.81	0.80

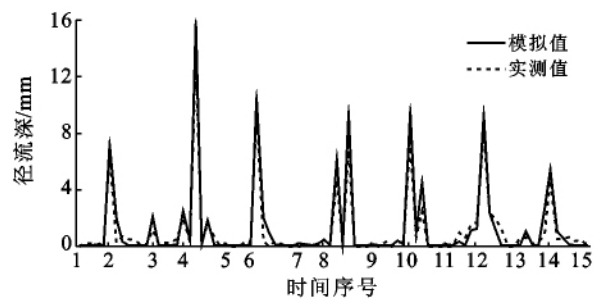


图 1 燕沟流域月径流实测值和模拟值对比

注:时间序号 1 为 2002 年 1 月;2 为 2002 年 6 月;3 为 2003 年 1 月;4 为 2003 年 6 月;5 为 2004 年 1 月;6 为 2004 年 5 月;7 为 2005 年 1 月;8 为 2005 年 5 月;9 为 2006 年 1 月;10 为 2006 年 7 月;11 为 2007 年 1 月;12 为 2007 年 6 月;13 为 2008 年 1 月;14 为 2008 年 6 月;15 为 2008 年 12 月。

### 4 结论

本文的研究是基于 SWAT 的 ArcGIS 界面版本 SWAT 2005,应用 2002—2008 年的数据构建了燕沟流域的 SWAT 模型,并对燕沟流域的逐月径流过程进行了模拟分析。使用 Nash—Sutcliffe 效率系数和相关系数 r<sup>2</sup> 对模拟和实测值进行计算,校准期和验证期的 Ens 分别为 0.76,0.81,相关系数 r<sup>2</sup> 分别为 0.79,0.80,达到了模型评价的乙等标准。说明 SWAT 模型适用于黄土丘陵区燕沟流域。

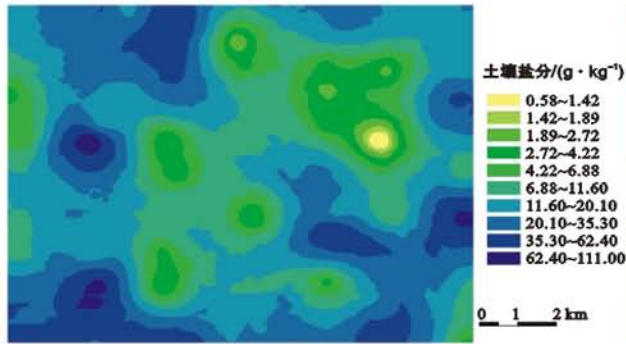
根据模拟结果 2002—2008 年别为 9.37,22.52,13.31,16.18,15.28,15.23 和 11.96 mm,说明流域

的总水量没有发生较大的改变。2002—2005 年和 2006—2008 年的月最大降雨量均值分别为 148.5, 132 mm, 相应月均径流深分别为 10.67, 8.03 mm, 这 2 个时段径流深与降雨量的比值分别为 0.07 和 0.06。结果表明燕沟流域实施退耕还林还草工程后, 由于土地利用格局发生了较大变化, 坡耕地大面积转化为草地和灌木林地, 在流域总水量保持基本不变的情况下使流域的洪水量发生了比较明显的减少, 起到了减轻洪水灾害的作用。

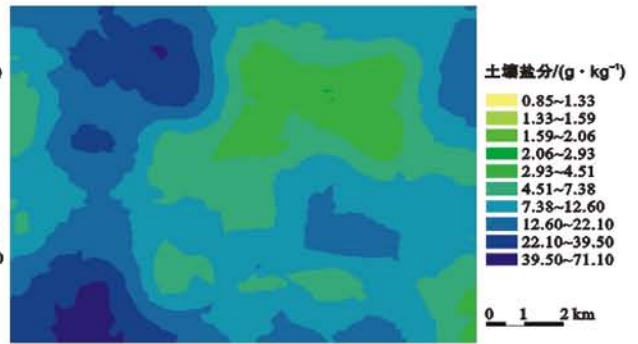
本文在模拟过程中出现的主要问题是壤中流和浅层地下径流参数选取的不确定性, 如 GW—REVAP, REVAPMN 等, 主要原因是数据库的建立不完善。由于流域的日径流数据缺失, 没有模拟流域的日径流量, 对参数的校准造成了一定的影响; 模型使用之前首先要对流域的实际情况进行全面的了解, 然后收集数据, 用最短的时间建立一个与流域实际情况最相符的数据库, 由于 SWAT 模拟是国外开发的模型, 模型中土壤、植被、天气、管理措施等数据无法直接利用, 而且模型在黄土高原地区的应用较少, 这些都限制了 SWAT 模型在黄土高原地区的深入研究。SWAT 模型改进重点应是提高模型数据库兼容性, 使模型能够更方便地使用其他水文模型的数据, 然后结合 SWAT 模型强大的模拟和预测功能, 这样, SWAT 模型将会成为一个使用简单但功能强大的水文模型。

#### [ 参 考 文 献 ]

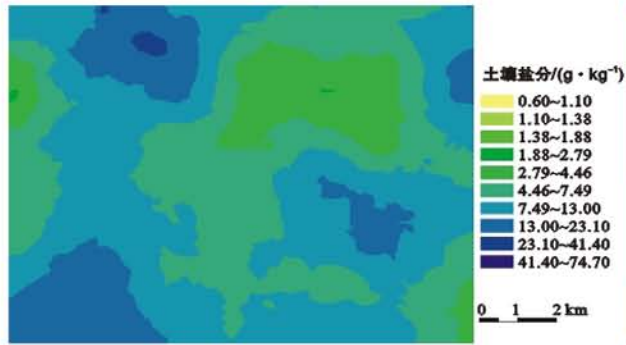
- [1] 徐学选, 张北赢, 琚彤军, 等. 黄土丘陵区降雨、径流、土壤水分的时空分布与利用对策[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 890-893.
- [2] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 437-445.
- [3] Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [4] Bauwens W. Application and evaluation of ESWAT on the Dender basin and the Wister Lake basin [J]. Griens-ven A V and Hydrological Processes, 2005, 19(3): 827-838.
- [5] Koelliker J K, Sophocleous M A, Govindaraju R S, et al. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south central Kansas [J]. Journal of Hydrology, 1999, 214(1/4): 179-196.
- [6] Haverkamp S, Eckhardt K, Fohrer N, et al. SWAT-G, a version of SWAT 99.2 modified for application to low and mountain range catchments [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9/10): 641-644.
- [7] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明, 等. SWAT 模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31-35.
- [8] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2004, 28(2): 22-26.
- [9] 罗睿, 徐宗学, 程磊, 等. SWAT 模型在三川河流域的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(5): 28-33.
- [10] 夏智宏, 周月华, 许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟[J]. 气象, 2009, 35(9): 59-67.
- [11] 朱新军, 王中根, 李建新, 等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 105-111.
- [12] 程磊, 徐宗学, 罗睿, 等. 渭河流域 1980—2000 年间 LUCC 变化分析[J]. 人民黄河, 2010, 32(4): 64-67.
- [13] 宋艳华, 马金辉. SWAT 辅助下的径流模拟与生态恢复水文响应研究: 以陇西黄土高原华家岭南河流域为例 [C]// 中国地理学会 2006 年学术年会论文摘要集. 2006.
- [14] 王海龙, 余新晓, 武思宏, 等. SWAT 模型灵敏度分析模块在黄土高原典型流域的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007(S2): 238-242.
- [15] 唐丽霞, 张志强, 王新杰, 等. 晋西黄土高原丘陵沟壑区清水河流域径流对土地利用与气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2010, 34(7): 800-810.
- [16] 朱利, 张万昌, 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. 资源科学, 2005, 27(2): 16-22.
- [17] Moore I D. Modeling subsurface stormflow on sloan PG, steeply sloping forested watersheds[J]. Water Resources and Research, 1984(12): 1815-1822.
- [18] 张楠, 秦大庸, 张占庞, 等. SWAT 模型土壤粒径转换的探讨[J]. 水利科技与经济 2007, 13(3): 168-169, 172.



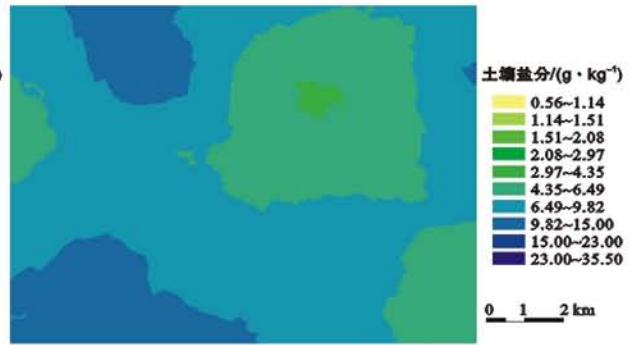
0—5 cm 土层



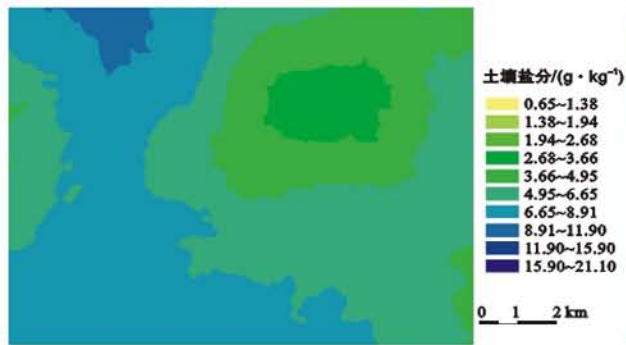
5—10 cm 土层



10—20 cm 土层



20—30 cm 土层

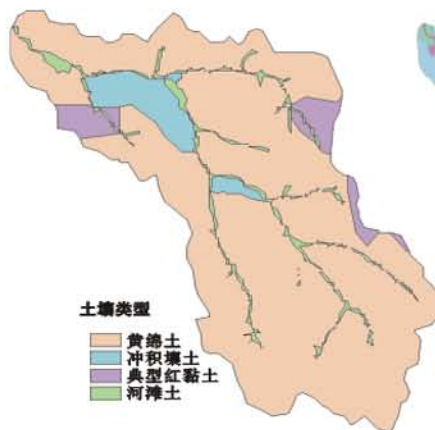


30—50 cm 土层

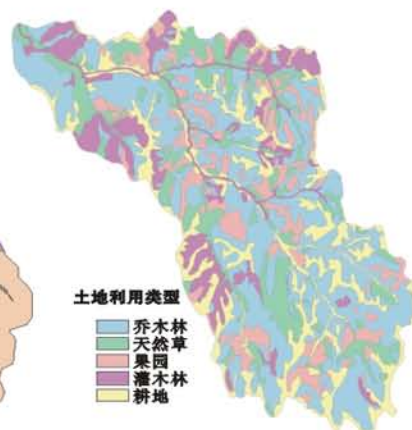


50—70 cm 土层

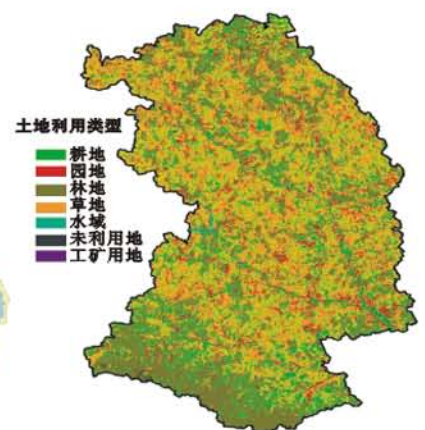
附图1 于田绿洲典型区域土壤盐分空间分布



附图2 燕沟流域土壤类型



附图3 燕沟流域土地利用类型



附图4 黄土高原沟壑区安塞县土地利用景观分布