基于模型耦合的土地利用变化和水文响应多情景分析

张 凌[1,2],南卓铜[1*],余文君[1]

（1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所，兰州 730000; 2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘要：排放情景下未来气候变化和土地利用变化及其水文响应是流域管理十分关心的问题。本文通过耦合土地利用/覆被变化模型Dyna-CLUE和水文模型SWAT，选择政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的两个温室气体排放情景（A1B和B1），对黑河流域中上游土地利用变化及水文响应进行情景分析。模型校准和验证结果表明，Dyna-CLUE和SWAT的模拟精度均比较满意。土地利用变化情景分析表明，不同排放情景下未来黑河流域中上游土地利用变化幅度均不大，同一情景下土地利用变化在中上游表现出各自的特点。水文响应多情景分析表明，不考虑土地利用变化，相对于参考情景即以1990-2009年历史数据模拟结果，高排放A1B情景下黑河流域上游和中游2011-2030年年平均河川径流分别呈微弱减少和明显增加的趋势，而低排放B1情景下分别呈明显减少和微弱减少的趋势。同一情景下，水文响应具有明显的区域差异性。考虑土地利用变化，高排放A1B情景下黑河流域上游和中游2011-2030年年平均河川径流分别小于和大于不考虑土地利用变化的情况，低排放B1情景下均小于不考虑土地利用变化的情况。分析表明，排放情景下气候变化和土地利用变化导致流域水文水资源的变化，而土地利用变化可能加剧或削弱气候变化导致的水文响应。

关键词：模型耦合；土地利用变化；水文响应；情景分析

DOI：10.3724/SP.J.1047.2013.00829

1 引言

黑河流域是我国西北干旱区典型的内陆河流域，受中部高纬度西风带环流的控制和极地冷气团的影响，气候干旱、风大沙多、土地贫瘠、自然条件恶劣、生态环境严酷和脆弱，并且呈不断恶化的趋势[1-3]。因此，保持黑河流域生态不再继续退化、恶化，促进黑河流域生态建设成为目前广泛关注和亟需解决的问题。

土地利用变化和水文响应是流域生态环境中十分重要的问题，尤其是在干旱的内陆河流域——黑河流域，土地利用和水文响应变化对流域生态系统结构和功能具有重要的影响[4-5]。气候和土地利用变化是其中的两个重要影响因素，而且气候变化会伴随着土地利用的变化，两者又共同影响水文响应[6-8]。

目前，黑河流域土地利用变化的研究有：蒙吉军等利用遥感影像解译的1995年和2000年的土地利用图，对黑河流域5年来的土地利用与覆盖变化研究，表明土地利用变化的区域差异显著、区域城镇化加快和生态环境不断恶化[9]；李传哲等利用1995、2000和2005年3期不同遥感影像解译的土地利用图，对黑河干流中游地区土地利用/覆盖的变化及其驱动力的研究，结果表明研究区土地利用发生了巨大的变化，社会经济因子是主要的驱动力[10]；姜朋辉等以1975、1987、1992、2001和2010年遥感影像为基础数据，对黑河流域中游地区近35年来的土地利用/覆盖变化及驱动力综合分析，结果表明，耕地和城乡居民工矿用地持续增加，草地和水域不断减少，主要的驱动力为社会经济因素[11]。然而，这些研究均采用历史的土地利用数据分析研究区的土地利用变化特征及规律，很少利用土地利用/覆盖变化模型对土地利用变化进行动态模拟及预

收稿日期：2013-11-08；**修回日期**：2013-12-30.

基金项目：国家自然科学基金项目（91125006）。

作者简介：张 凌（1988-），四川巴中人，硕士生，主要从事水文水资源的情景分析研究。E-mail:zhanglingky@126.com

***通讯作者**：南卓铜（1977-），浙江乐清人，研究员，研究方向为水文水资源决策支持系统和建模及环境研究。

E-mail：nztong@lzb.ac.cn

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

测。此外，张华等在3种不同的水资源情景下，应用CLUE-S模型对黑河流域中上游张掖市的土地利用变化进行了模拟，结果表明，耕地、城镇用地都在增加，林地和草地都在减少，水域变化不明显[12]。然而，此研究在情景的设置上仅考虑了水资源状况，而对决策者可能关心的温室气体排放情景下的土地利用变化研究相对较少。

关于黑河流域水文响应分析，吴志勇等利用VIC模型，在不同气候变化情景下，对黑河流域极端水文事件的响应进行了分析，结果表明相对于参考时期，在不同气候变化情景下，洪水和枯水事件均呈现增加的趋势[13]。陈亮设置了15种不同的气候变化情景，对黑河流域上游径流响应进行了模拟，结果表明径流和温度成反比的关系，和降水呈正比的关系[14]。这些研究基于单一的水文模型，通过一些简单假设法来分析不同气候变化情景下的水文响应，这是不充分的，因为气候变化伴随的土地利用变化也一样影响到水文响应。因此，我们需要通过耦合土地利用变化模型和水文模型，考虑气候变化和土地利用变化对水文响应的共同影响进行多情景分析。

本研究通过耦合土地利用/覆盖变化模型Dyna-CLUE和水文模型SWAT，选择政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的两个温室气体排放情景（高排放A1B和低排放B1），对黑河流域中上游土地利用变化及水文响应进行多情景分析，以期为黑河流域河流土地利用和水资源规划管理提供科学的依据。

2 研究区及数据

（1）黑河流域是中国西北典型的内陆河流域，位于河西走廊和祁连山中段，南北跨越青海、甘肃、内蒙古3省（自治区）。本研究区为黑河流域中上游地区（图1），是从黑河干流源头（祁连山）到正义峡之间的流域。上游祁连山地是流域的产流区，中游走廊平原集中了全流域90%以上的耕地和人口，是流域的主要用水区。同时，为了对该区域有限的水资源进行开发利用和精细管理，中游走廊平原逐渐形成了十分密集和发达的人工渠系。

（2）研究数据包括IPCC数据，Dyna-CLUE模型数据和SWAT模型数据。IPCC数据为服务于第4次报告的HadCM3模型在排放情景（A1B和B1）下模拟的全球尺度的降雨和温度数据（http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/SRES_AR4/index.html），时间序列为1980-2030年，时间分辨率为月，空间分辨率为2.5°×3.75°（纬度×经度）。Dyna-CLUE模型数据主要包括土地利用数据和模型驱动数据，均来自于寒区旱区科学数据中心（http://westdc.westgis.ac.cn）。土地利用数据包括1986年和2000年覆盖整个黑河流域的土地利用/覆盖数据集，张掖地区2005年土地利用/覆盖数据集；驱动变量包括DEM、坡度、坡向、土壤类型、到公路的距离、到铁路的距离、到河流的距离、到水库的距离、到居民点的距离、地均GDP、人均GDP和人口密度，所有数据均统一到WGS Albers投影系统，空间分辨率为300m。SWAT模型数据主要包括DEM数据、土壤数据、土地利用数据和气象数据。DEM数据、土壤数据及土地利用数据（2000年）均来源于寒区旱区科学数据中心，数据均统一到WGS Albers投影系统，空间分辨率为300m。气象数据包括鼎新、酒泉、高台、张掖、山丹、托勒、野牛沟、祁连、永昌共9个气象站点的降水、气温、相对湿度和风速等数据，时序为1980-2009年，数据来源于中国气象科学数据共享网（http://cdc.cma.gov.cn/home.do）。为了提高SWAT模型模拟精度，本研究选择10个高程不同的插值站点（图1），采用MicroMet对其降雨进行插值[15]，这些插补站点的引入可提高SWAT对气象要素插值的精度。

3 模型耦合的多情景分析

3.1 模型分析

Dyna-CLUE（Dynamic Conversion of Land-Use and its Effects Model）模型是一个考虑土地类型之间竞争关系，能够定量描述土地利用变化空间分布的多尺度土地利用变化模型[16-18]。模型由两个模块组成，即非空间分析模块（土地利用需求模块）和空间分析模块（土地空间分配模块）。运行Dyna-CLUE模型需要5种类型的数据，包括土地需求数据、空间特征数据、邻域特征数据、空间政策限制数据和土地利用类型之间的转换参数。

Dyna-CLUE模型模拟结果的验证，采用图像分类精度常用的一种评价方法——错误矩阵，它是通过将参考图像中每个像元的位置和分类与分类图像中相应的位置和分类相比较计算得到的[19]。本

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

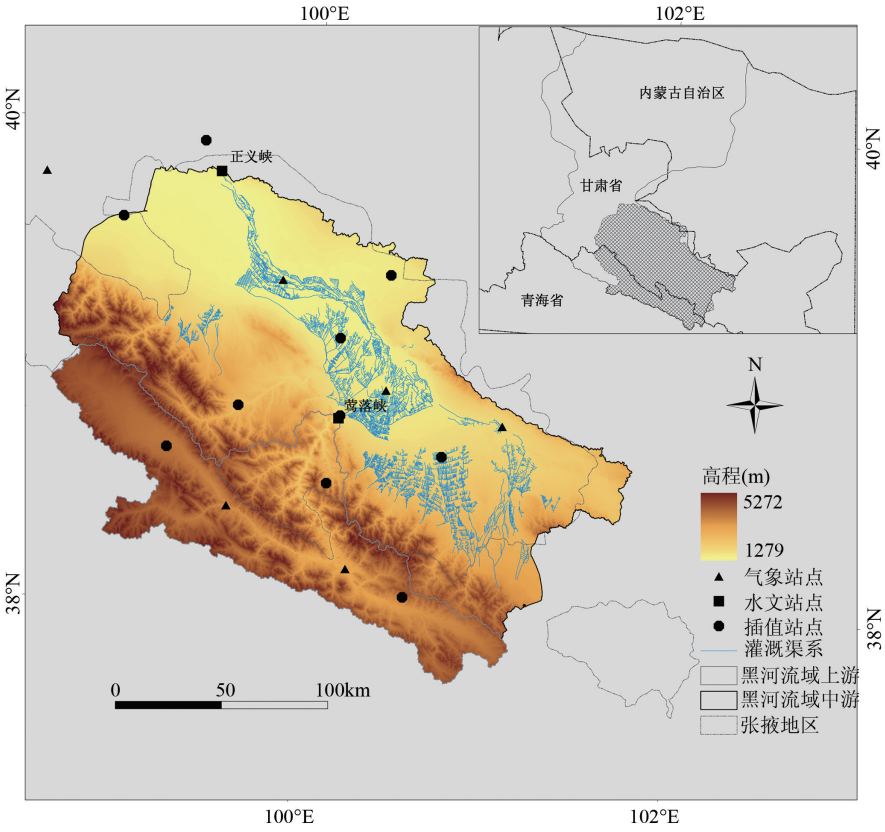

图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

研究选择黑河流域中上游2000年及中游张掖地区2000、2005年土地利用图对模型进行验证。

SWAT（Soil and Water Assessment Tool）模型是美国农业部下属的农业研究所开发的具有物理基础的分布式水文模型，是分析土地利用变化和气候变化对水文影响的一个重要工具[20]。在SWAT模型中，首先根据流域出水口位置及DEM，将流域划分为许多子流域，然后再根据土地利用数据、土壤数据及坡度数据将子流域划分为许多水文响应单元（HRUs, Hydrological response Units），最后以水文响应单元为基础，模拟流域中水、沙和化学物质的运输和转移过程。

本研究中，SWAT模型校准和验证选择黑河流域上游出口莺落峡和中游出口正义峡出口月径流观测数据。上游莺落峡站径流观测值受到水库的影响而呈现非自然径流状态，因此，本研究分别采用黑河流域上游莺落峡站月径流观测数据的还原值及中游正义峡站月径流观测数据对SWAT模型进行校准和验证[21]。校准期时段分别为1990-1999年、2000-2004年；验证期时段分别为2000-2009年、2005-2009年。1989年作为SWAT模型的预热阶段，假定校准好的SWAT模型参数在后面水文响应情景分析中仍然适用。本研究在参考已有文献的基础上，对SWAT模型采用试错法进行手动校准[21-23]，模型校准和验证结果采用Nash效率系数（Ens）和相关系数R^2进行评价。

3.2 排放情景

A1B、B1情景是政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的2个温室气体和气溶胶排放情景。A1B情景描述了这样一个未来世界：经济增长非常快，全球人口数量峰值出现在本世纪中叶并随后下降，新的更高效的技术被迅速引进，在所有能源供给和终端利用技术平行发展的假定下，不过分依赖于某种特定能源，对未来温室气体排放持悲观状态（高排放）。B1情景描述了一个趋同的未来世界：人口变化和A1B情景相似，强调社会、经济和环境可持续发展的全球解决方案，其中，包括公平性的提高，不采用额外的气候政策干预。与A1B情景不同，B1情景是经济结构向服务和信息经济方向迅速调整，伴之以材料密集程度下降和清洁能源和资源高效利用，强调社会公平和环境保护，对未来温室

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

气体排放持乐观状态(低排放)。

在不同排放情景下,未来气象数据(降雨和气温)选择服务于IPCC第4次报告的HadCM3模型在全球尺度的模拟结果,利用较简单Delta降尺度方法[24-25],对HadCM3模型模拟结果进行降尺度处理,构建黑河流域中上游在A1B、B1情景下2011-2030年的降雨和温度数据。

在不同排放情景下,未来土地利用需求特征数据参考日本国立环境研究所的亚太地区综合模型(Asia-Pacific Integrated Model, AIM)在ASIAP(China and central planned Asia, South and East Asia)区域模拟结果[26-27],具体需求特征见表1。根据排放情景下土地需求特征,利用Dyna-CLUE模型模拟黑河流域中上游未来土地利用变化。

表1 A1B和B1情景下黑河流域中上游土地需求特征

Tab.1 Land use demand characteristics in the upper and middle reaches of Heihe River Basin with A1B and B1 scenarios

土地利用类型	A1B	B1
耕地、林地、草地	AIM模拟	AIM模拟
水域	保持2000年面积不变	保持2000年面积不变
建设用地	随ASIAP区域的人口趋势变化	随ASIAP区域的人口趋势变化
未利用地	剩下的土地面积	剩下的土地面积
空间政策限制	无空间限制政策	设置坡度大25%的林地和草地为限制区域

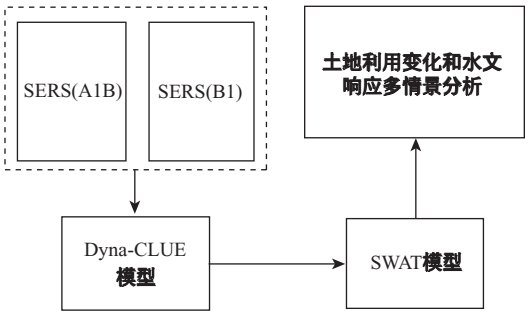

图2 模型耦合

Fig.2 Schema of model coupling

3.3 模型耦合

本研究模型耦合为单向的耦合方式(图2),首先,在不同排放情景(A1B和B1)下,利用Dyna-CLUE模型模拟黑河流域中上游在2011-2030年的土地利用变化,然后,将不同情景下模拟的2015、2020、2025和2030年土地利用图输入到SWAT模型,实现Dyna-CLUE模型和SWAT模型的耦合,并对黑河流域中上游土地利用变化和水文响应进行情景分析。

3.4 结果与分析

3.4.1 模型验证

利用黑河流域中上游2000年及中游张掖地区2000、2005年土地利用现状图对Dyna-CLUE模型模拟精度验证,如表2所示。结果表明,中上游2000年及中游张掖地区2000、2005年土地利用分布模拟的总体精度均大于等于0.90;耕地、林地、草地和未利用地模拟精度均较高(最小制图精度为0.83);建设用地模拟精度相对较低,这主要是因为建设用地变化容易受政策、人为等不确定性因素的影响,而这些因素在模型中没有得到充分的考虑;2005年中游张掖地区水域模拟精度相对较低,这与黑河流域在2000年及之后的分水政策有关[10, 28]。

表2 黑河流域中上游及中游张掖地区模型模拟精度验证结果

Tab.2 Validations of the model simulation in the upper and middle reaches of Heihe River Basin and in the Zhangye area located in the middle reaches

地区和年份	总体精度	制图精度					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
中上游2000年	0.92	0.89	0.90	0.92	0.83	0.75	0.94
中游张掖2000年	0.92	0.89	0.90	0.91	0.82	0.75	0.95
中游张掖2005年	0.90	0.83	0.88	0.89	0.72	0.71	0.95

黑河流域上游出口莺落峡月径流数据还原值与模拟值对比结果如图3所示,校准期(1990-1999年)Ens为0.88,R^2为0.92,验证期(2000-2009年)Ens为0.86,R^2为0.88(表3)。黑河流域中游出口正义峡月径流模拟值与观测值对比结果如图4所示,校准期(2000-2004年)Ens为0.63,R^2为0.69;验证期(2005-2009年)Ens为0.60,R^2为0.72(表3)。与莺落峡相比,正义峡径流模拟精度相对较低,这与黑河流域中游人类活动密集及复杂的人工灌溉渠系系统有关。总体上,黑河流域中上游两个径流观

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

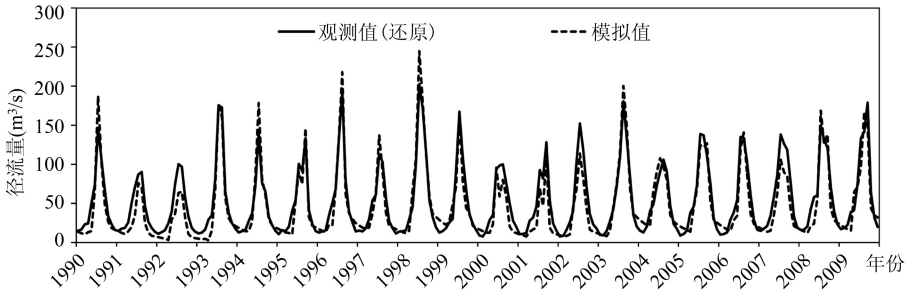

图3　莺落峡站月径流观测值和模拟值

Fig.3　Monthly measured and simulated streamflow at the Yingluoxia station

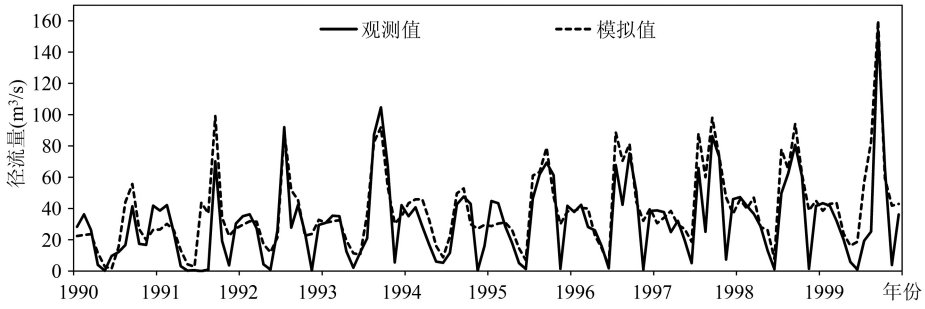

图4　正义峡站月径流观测值和模拟值

Fig.4　Monthly measured and simulated streamflow at the Zhengyixia station

测站月径流量在校准和验证期模拟效果比较满意，满足模拟精度的要求[29-30]。

表3　校准期和验证期月径流模拟精度评价结果

Tab.3　Model assessment of the monthly simulated streamflow

站点	时间段	R^2	Ens
莺落峡	校准期	0.92	0.88
	验证期	0.88	0.85
正义峡	校准期	0.69	0.63
	验证期	0.72	0.60

3.4.2　土地利用变化情景分析

（1）高排放情景（A1B）

在A1B情景下，相对于2000年的土地利用图（图5（a）），黑河流域中上游2015、2020、2025和2030年土地利用模拟的分布图（图5（b）-（e））空间分布差异不明显，因此，在A1B情景下黑河流域中上游未来土地利用变化幅度不大。在A1B情景下，相对于2000年，黑河流域中上游2011-2030年耕地、水域和未利用地呈现减少的趋势，林地、草地和建设用地呈现增加的趋势，变化面积最大的土地类型为未利用地，至2030年，减少的未利用地面积占黑河流域中上游总面积的0.92%。如果只考虑上游区域，2011-2030年耕地、林地、草地和建设用地均表现为增加的趋势，水域和未利用地呈减少的趋势，变化面积最大的地类仍为未利用地，至2030年，减少的未利用地面积占上游总面积的2.83%。总体上，A1B情景下黑河流域中上游区域及单独的上游地区土地利用变化幅度均不大，但是，在不同区域变化趋势和幅度均不一样，因此，土地利用变化区域差异明显。

（2）低排放情景（B1）

黑河流域中上游2000年土地利用图和B1情景模拟2015、2020、2025和2030年土地利用分布如图6所示。相对于2000年土地利用图，B1情景下模拟的土地利用图空间分布差异不明显，表明黑河流域中上游土地利用变化幅度也不大。在B1情景下，相对于2000年，黑河流域中上游2011-2030年耕地、水域和未利用地呈现减少的趋势，林地、草地和建设用地呈现增加的趋势，变化面积最大的仍为未利用地，至2030年，减少的未利用地面积占黑河流域中上游总面积的1.36%。对于上游区域，B1情景下，耕地、林地、草地和建设用地均表现为增加的趋势，水域和未利用地呈减少的趋势，变化面积最大

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

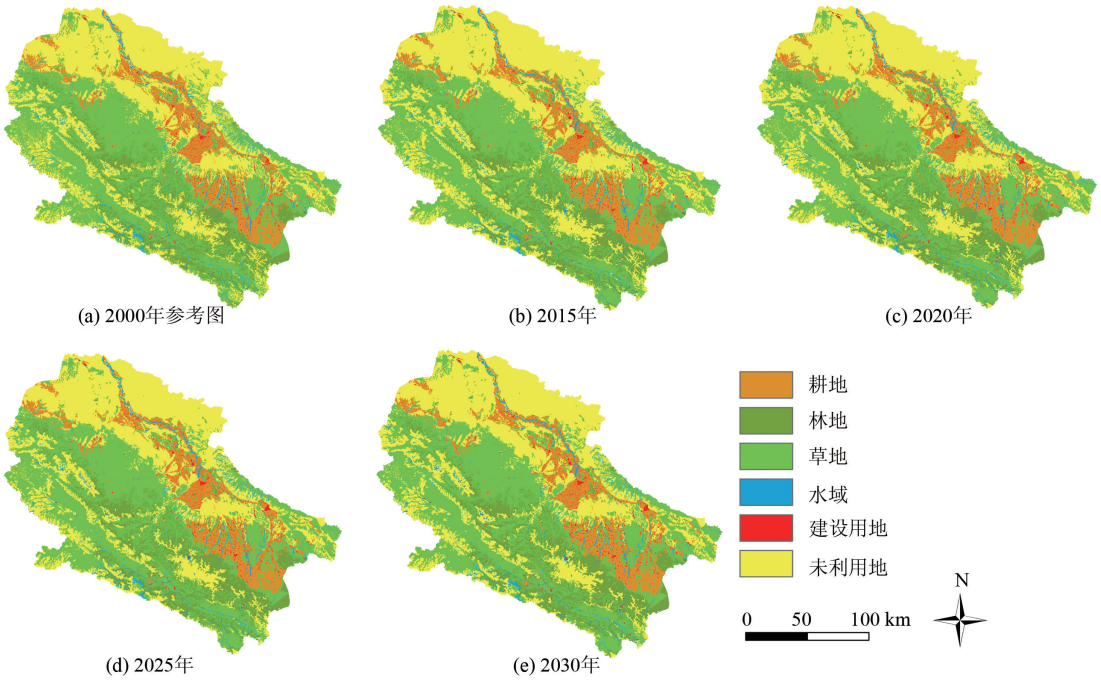

图5 黑河流域中上游A1B情景下的土地利用模拟分布图

Fig. 5 Land use maps of the upper and middle reaches of Heihe River Basin under the A1B scenario

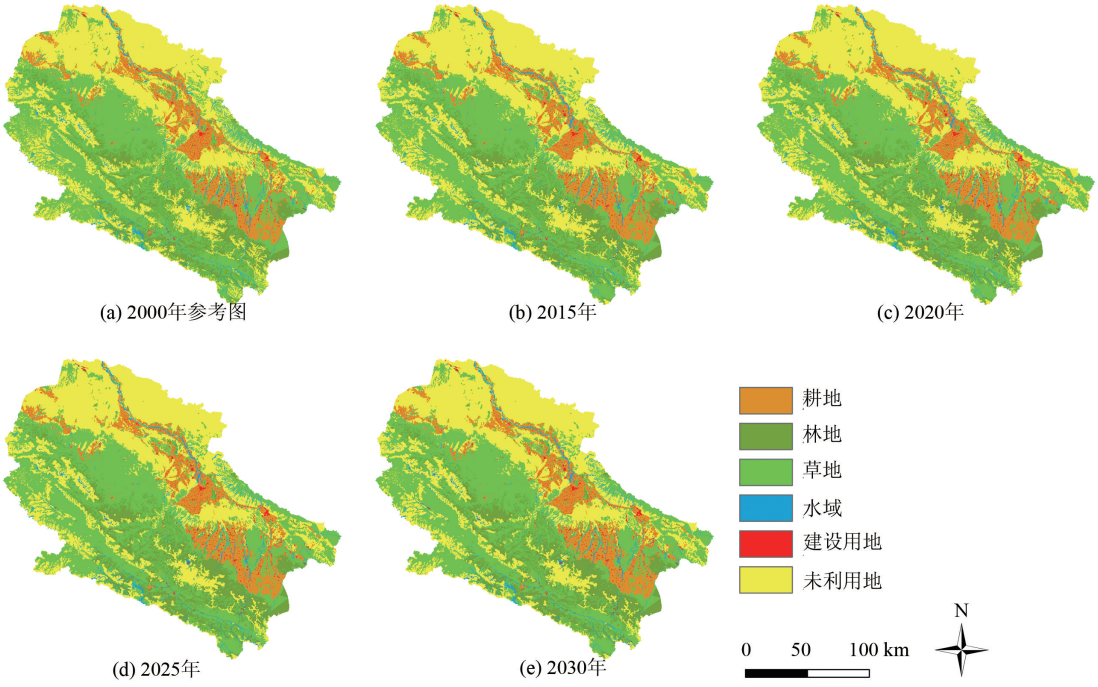

图6 黑河流域中上游B1情景下模拟的土地利用分布图

Fig.6 Land use maps of the upper and middle reaches of Heihe River Basin under the B1 scenario

的仍为未利用地，至2030年减少的未利用地面积占上游总面积的3.63%。总体上，低排放的B1情景下黑河流域中上游区域及上游地区土地利用变化幅度均不大，但是，在上游和中上游变化趋势和幅度均不一样，土地利用变化区域差异明显。

(3)情景分析

在A1B和B1情景下，相对于2000年，黑河流域中上游2011-2030年耕地、水域和未利用地均呈现

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

减少的趋势,林地、草地和建设用地均呈现增加的趋势,但是不同情景下变化幅度不一样(图7),至2030年,B1情景下林地和草地增加的面积及未利用地减少面积明显大于A1B情景。因此,未来黑河流域中上游生态用地(林地和草地)在低排放情景(B1)的面积大于高排放情景(A1B)。

在A1B和B1情景下,黑河流域上游在2011-2030年耕地、林地、草地和建设用地均表现为增加的趋势,水域和未利用地均呈减少的趋势,与中上游地区相似,上游地区不同情景下不同土地利用类型变化幅度也不一样(图8)。分析表明,即使在同一情景下,上游和中上游地区土地利用面积相对变化量不同,如草地和未利用地面积在上游相对变化量明显大于中上游地区(图7、8),即土地利用变化具有明显的区域性。

3.4.3　水文响应情景分析

排放情景下气候变化和土地利用变化均会导致水文水资源的变化,因此本文分两种情况(不考虑土地利用变化和考虑土地利用变化)和两个区域(上游和中游地区)分析不同排放情景下的水文响应。其中,不考虑土地利用变化情况即未来只考虑排放情景下气候变化的水文响应;考虑土地利用变化的情况即综合考虑排放情景下土地利用变化和气候变化对水文水资源共同影响。同时,为了方便比较,将1990-2009年历史气象数据和历史土地利用数据(2000年)驱动SWAT模型模拟的结果作为参考情景。

(1)高排放情景(A1B)

不考虑土地利用变化,相对于参考情景,A1B情景下黑河流域上游模拟的2011-2030年年平均河川径流呈微弱减少趋势,且年平均河川径流的年内分配在5-10月份差异较明显,特别是夏季(6-8月)(图9(a))。A1B情景下未来河川径流的变化是由于该情景下未来降雨和温度发生了变化(其他气象因素假设和参考情景一致)。A1B情景下未来降雨年内分配如图10(a)所示,多年年平均降雨量与河川径流的年内分配相似,与参考情景相比,在5-10月降雨量差异较大,尤其是夏季,这也表明降雨对黑河流域上游河川径流有直接的影响。A1B情景下未来多年月平均最高温度年内分配如图11所示,和参考情景相比,多年月平均最高温度在多数月份

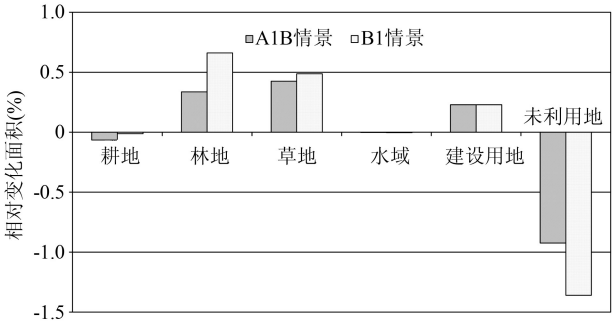

图7　不同情景下黑河流域中上游2000-2030年各地类面积相对变化

Fig.7　Relative land use change in the upper and middle reaches of Heihe River Basin between 2000 and 2030 under different scenarios

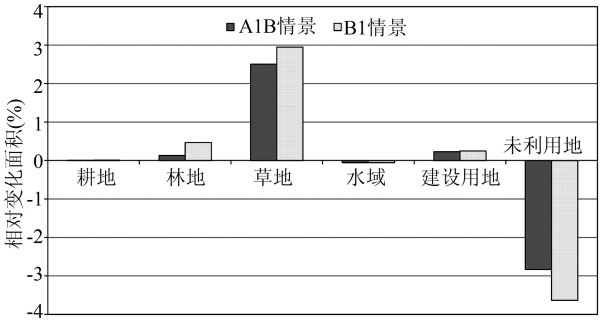

图8　不同情景下黑河流域上游2000-2030年各地类面积相对变化

Fig.8　Relative land use change in the upper reache of Heihe River Basin between 2000 and 2030 under different scenarios

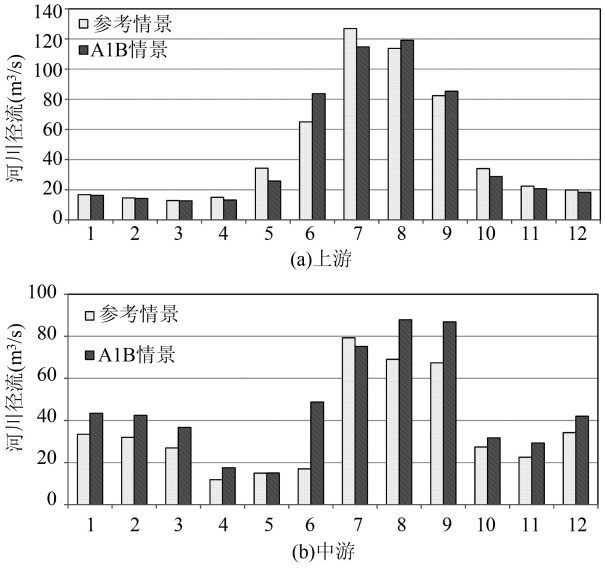

图9　参考情景和A1B情景下黑河流域中、上游多年年平均河川径流年内分配

Fig.9　Annual streamflow distribution in the upper and middle reaches of Heihe River Basin under the reference and A1B scenarios

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

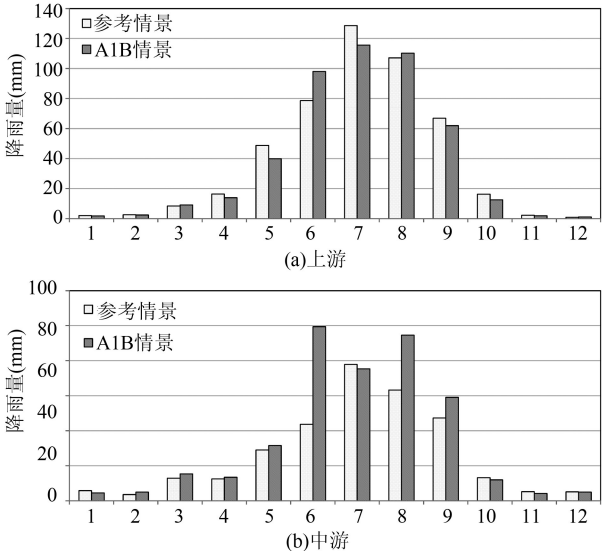

图10 参考情景和A1B情景下黑河流域中、上游多年年平均降雨量

Fig.10 Annual precipitation distribution in the upper and middle reaches of Heihe River Basin under the reference and A1B scenarios

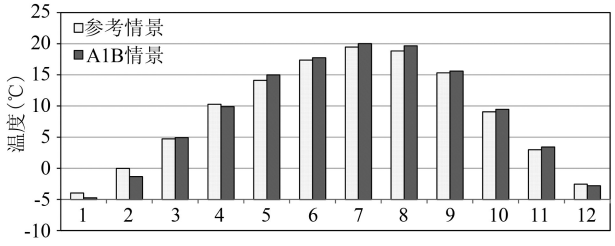

图11 参考情景和A1B情景下黑河流域上游多年月平均最高温度年内分配

Fig.11 Monthly average maximum temperature distribution in the upper reaches of Heihe River Basin within the study years under the reference and A1B scenarios

更高，温度的差异也是导致黑河流域上游未来河川径流变化的原因之一。

不考虑土地利用变化，相对于参考情景，模拟的A1B情景下黑河流域中游模拟的2011-2030年年平均河川径流呈明显增加趋势，相对于参考情景，模拟的2011-2030年年平均河川径流年内分配在各月份（除5月份）差异较明显（图9(b)）。黑河流域中游河川径流分别受上游来水，中游降水量和温度的影响。A1B情景下中游未来多年年平均降雨量年内分配如图10(b)所示，相对于参考情景，6-9月降雨增加，上游来水增加，中游河川径流也相应的增加；12月至翌年三月，降水和上游来水差异不明显，但是，中游河川径流在这段时间明显增加，这是因中游在这段时间停止灌溉，前期的灌溉水回归入河道使河川径流在这段时间明显增加。

A1B情景下考虑土地利用变化。黑河流域上游2011-2030年年平均河川径流量略小于不考虑土地利用变化的情况，这是因黑河流域上游未来林地和草地呈现增加的趋势，导致上游蒸散发增加，河川径流减少，同时，由于上游土地利用变化幅度不大，因此，河川径流在两种情况下差异均不是十分明显。考虑土地利用变化下，A1B情景下中游2011-2030年年平均河川径流量略大于在不考虑土地利用变化的情况，这是因未来中游耕地退化，灌溉用水减少，导致中游河川径流较大。A1B情景下黑河上游及中游未来河川径流量年内分配在考虑和不考虑土地利用变化两种情况下相似。

（2）低排放情景（B1）

不考虑土地利用变化，相对于参考情景，B1情景下黑河流域上游2011-2030年年平均河川径流呈明显减少趋势，这主要是因为2011-2030年降雨量在B1情景下呈现明显的减少趋势。相对于参考情景，2011-2030年河川径流年内分配在在各月份（除6月份）均表现减少的趋势（图12(a)）。

不考虑土地利用变化，相对于参考情景，B1情景下黑河流域中游2011-2030年年平均河川径流呈微弱的减少趋势，而中游降雨呈现增加的趋势，导

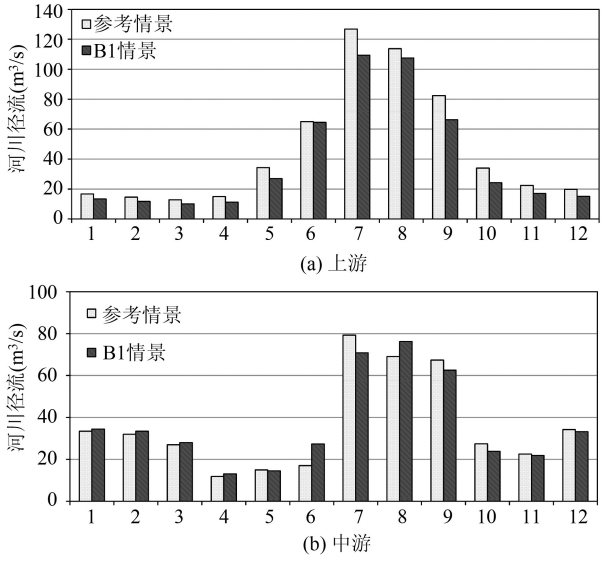

图12 参考情景和B1情景下黑河流域中、上游多年年平均河川径流年内分配

Fig.12 Annual streamflow distribution in the upper and middle reaches of Heihe River Basin under the reference and B1scenarios

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

致中游河川径流增加的原因是上游来水在B1情景下明显减少。相对于参考情景,中游2011-2030年年平均河川径流年内分配在6-9月变化比较明显,其他月份变化不大(图12(b))。

考虑土地利用变化,B1情景下黑河流域上游2011-2030年年平均河川径流量略小于不考虑土地利用变化的情况。考虑土地利用变化下,B1情景下中游2011-2030年年平均河川径流量小于不考虑土地利用变化的情况,这是因为未来中游耕地退化,灌溉用水减少,导致径流增加,但是林地和草地面积增加,蒸散发增加,导致径流减少,而且林地和草地增加导致中游径流减少量大于由于耕地减少导致的径流增加量。B1情景下黑河上游及中游未来河川径流量年内分配在考虑和不考虑土地利用变化两种情况下相似。

(3)情景分析

不考虑土地利用变化,相对于参考情景,A1B情景下黑河流域上游2011-2030年年平均河川径流呈微弱减少趋势,而在B1情景下呈现明显的减少趋势。A1B情景下上游2011-2030年年平均河川径流的年内分配在5-10月变化较明显,B1情景下除6月份,其他月份均明显地表现为减少的趋势。

不考虑土地利用利用变化,相对于参考情景,A1B情景下黑河流域中游2011-2030年年平均河川径流呈明显增加趋势,而在B1情景下呈现微弱减少趋势。相对于参考情景,A1B情景下中游2011-2030年年平均河川径流在各月份均呈现增加的趋势,而B1情景下,在6-9月变化比较明显,其他月份变化不大。分析表明即使在同一情景下,不同区域的水文响应也可能具有明显的差异性。

考虑土地利用的变化,黑河流域上游2011-2030年年平均河川径流在A1B情景及B1情景下均小于不考虑土地利用变化的情况。考虑土地利用变化,中游河川径流在A1B情景下,大于不考虑土地利用变化的情况,而在B1情景下要小于不考虑土地利用变化的情况,因此,结果表明土地利用变化可能加剧气候变化的水文响应,也可能削弱气候变化的水文响应,即土地利用变化对气候变化的水文响应具有双向的(加剧和削弱)影响。

4 结论

本研究通过耦合Dyna-CLUE模型和SWAT模型,选择政府间气候变化专门委员会(IPCC,2000)发布的两个温室气体排放情景(A1B和B1),对黑河流域中上游土地利用变化及水文响应进行多情景分析,得到以下主要结论:

(1)通过黑河流域中上游及张掖地区两个空间尺度的土地利用现状图对Dyna-CLUE模型进行验证,表明该模型具有很好的适用性。通过黑河流域中上游两个径流观测站(莺落峡和正义峡)的径流数据对SWAT模型校准和验证,结果表明该模型模拟结果比较满意,达到了模拟精度的要求。

(2)土地利用变化情景分析表明,不同排放情景下未来黑河流域中上游土地利用变化幅度均不大,同一排放情景下土地利用变化具有明显的区域特点。生态用地(林地和草地)在低排放情景(B1)的面积大于高排放情景(A1B)。

(3)水文响应情景分析表明,只考虑气候变化,相对于参考情景,高排放A1B情景下黑河流域上游2011-2030年年平均河川径流呈微弱减少趋势,而在低排放B1情景下呈现明显的减少趋势;而在中游,2011-2030年年平均河川径流在A1B情景下呈明显增加趋势,在B1情景下呈现微弱减少趋势。如果综合考虑气候变化和土地利用的变化,黑河流域上游出口河川径流在2种排放情景下均小于不考虑土地利用变化的情况,而中游河川径流在A1B情景下大于不考虑土地利用变化的情况,在B1情景下要小于不考虑土地利用变化的情况,这表明了排放情景下气候变化和土地利用变化导致流域水文水资源的变化,而土地利用变化可能加剧或削弱气候变化导致的水文响应。

参考文献:

[1] 程国栋,赵传燕.干旱区内陆河流域生态水文综合集成研究[J].地球科学进展,2008,166(10):1005-1012.

[2] 廉宁霞.试论黑河流域的生态环境及其保护[J].甘肃农业科技,2008,389(5):34-36.

[3] 张法霖,王金叶,常宗强.黑河流域生态环境建设与和谐社会构建[J].中国水土保持,2006(5):15-17.

[4] 程国栋.黑河流域可持续发展的生态经济学研究[J].冰川冻土,2002,24(4):335-343.

[5] 孙力炜,张勃,张建香,等.内陆河流域土地利用/覆盖变化的生态效益评价——以疏勒河中下游地区为例[J].干旱区资源与环境,2013,27(3):80-85.

[6] Cammerer H, Thieken A H, Verburg P H. Spatio-temporal dynamics in the flood exposure due to land use changes in the Alpine Lech Valley in Tyrol (Austria)[J]. Natural Haz-

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ards, 2012,1-28.

[7] Mango L M, Melesse A M, Mcclain M E, *et al*. Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: Results of a modeling study to support better resource management[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(7):2245.

[8] Park J Y, Park M J, Joh H K, *et al*. Assessment of MIROC 3. 2 HiRes climate and CLUE-s land use change impacts on watershed hydrology using SWAT[J]. Transactions of the ASABE, 2011,54(5):1713-1724.

[9] 蒙吉军,吴秀芹,李正国.黑河流域1988-2000年土地利用/覆被变化研究[J].北京大学学报:自然科学版,2005,40(6):922-929.

[10] 李传哲,于福亮,刘佳,等.近20年来黑河干流中游地区土地利用/覆被变化及驱动力定量研究[J].自然资源学报,2011,26(3):353-363.

[11] 姜朋辉,赵锐锋,赵海莉,等.1975年以来黑河中游地区土地利用/覆被变化时空演变[J].生态与农村环境学报,2012,28(5):473-479.

[12] 张华,张勃.不同水资源情景下干旱区未来土地利用/覆盖变化模拟——以黑河中上游张掖市为例[J].冰川冻土,2007,29(3):397-405.

[13] 吴志勇,郭红丽,金君良,等.气候变化情景下黑河流域极端水文事件的响应[J].水电能源科学,2010,28(2):7-9,46.

[14] 陈亮.基于区域气候模式和VIC模型的黑河流域陆气相互作用研究[D].兰州:兰州大学,2011,1-69.

[15] Liston G E, Elder K. A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet) [J]. Journal of Hydrometeorology, 2006,7(2):217-234.

[16] Verburg P H, Overmars K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: Exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model[J]. Landscape Ecology, 2009,24(9):1167-1181.

[17] Verburg P H, Overmars K P, Huigen M G A, *et al*. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines[J]. Applied Geography, 2006,26(2):153-173.

[18] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, *et al*. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model[J]. Environmental Management, 2002,30(3):391-405.

[19] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2003,203-208.

[20] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, *et al*. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions[J]. Transactions of the ASABE, 2007(50):1211-1250.

[21] 余文君.SWAT模型在黑河山区流域的改进与应用[D].南京:南京师范大学,2012,1-50.

[22] 李呈罡. SWAT模型在黑河中上游流域的改进与集成模拟研究[D].南京:南京师范大学,2012,1-51.

[23] 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.

[24] Diaz-Nieto J, Wilby R L. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom[J]. Climate Change, 2005,69(2):245-268.

[25] Hay L E, Wilby R L, Leavesley G H. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(2):387-397.

[26] Morita T. Greenhouse gas emission scenario database ver 5.0 operating manual[EB/OL]. Japan: National Institute for Environmental Studies Center for Global Environmental Research, 1999.

[27] Morita T. Emission scenario database prepared for IPCC Special Report on Emission Scenarios[R]. IPCC, 1999.

[28] 李娜,颜长珍,廖杰.黑河中游分水前后林草变化动态监测[J].生态学杂志,2009,28(9):1719-1722.

[29] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, *et al*. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007,50(3):885-900.

[30] Henriksen H, Troldborg L, Nyegaard P, *et al*. Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark[J]. Journal of Hydrology, 2003,280(1):52-71.

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Coupling LUCC and Hydrological Models to Predict Land Use Change and Hydrological Response under Multiple Scenarios

ZHANG Ling[1,2], NAN Zhuotong[1*] and YU Wenjun[1]

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou* 730000, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Land use and climate change under emission scenarios and their hydrological responses are some most concerned issues in watershed management. By coupling a land use land change model, Dyna-CLUE, and a hydrological model, SWAT, this paper predicts land use changes and hydrological responses in the upper and middle reaches of Heihe River Basin (HRB) under two emission scenarios, A1B and B1, from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). After calibration, the models validate their applicability in the study area. Scenario analysis shows no obvious land use changes in the upper and middle reaches of HRB with both emission scenarios while with a same scenario, land use changes present regional characteristics. In terms of future hydrological responses, if we only consider the climate change, comparing to the reference scenario that is created with historical data of 1990~2009, mean annual streamflow in the period of 2011~2030 shows a slight decrease in the upper reaches of HRB and an obvious increase in the middle reaches under the high emission scenario (A1B), and an obvious decrease and a slight decrease respectively under the low emission scenario (B1). Under a same scenario, hydrological responses present regional characteristics in the upper and middle reaches. As climate change also causes land use change which in turn impacts hydrological responses, we compare the joint impact case with the case of climate change only. Mean annual streamflow in the period of 2011~2030 becomes less in the upper reache and greater in the middle reache under the high emission scenario (A1B), and less in both reaches under the low emission scenario (B1). The analysis indicates that climate and land use changes under emission scenarios in the study area will lead to hydrological and water resources changes and the land use change may intensify or weaken hydrological responses caused by climate change.

Key words: model coupling; land use change; hydrological response; scenario analysis

***Corresponding author:** NAN Zhuotong, E-mail: nztong@lzb.ac.cn

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net