

DOI: 10.5846/stxb201303010328

刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 李宗善, 杨荣金. 黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化及水土保持服务功能. 生态学报, 2014, 34(23): 7013-7025.
Liu J W, Jin T T, Liu G H, Li Z S, Yang R J. Changes in land use and soil and water conservation of the upper and middle reaches of Heihe river basin during 2000—2010. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 7013-7025.

黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化 及水土保持服务功能

刘金巍¹, 靳甜甜^{2,*}, 刘国华¹, 李宗善¹, 杨荣金³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

(2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院生态环境评价中心, 北京 100038)

摘要: 基于遥感影像数据, 分析了黑河中上游地区 2000 年到 2010 年土地利用变化, 在此基础上, 从上游、中游以及整个区域的角度综合评价了该区域的水源涵养和土壤保持生态系统服务功能物质质量变化。研究结果表明: ①研究区 60% 以上为未利用地, 2000—2010 年, 耕地、林地和未利用地面积大量增加, 草地和水域面积减少。②耕地增加以荒漠和草地转入为主; 林地转入表现为草地和荒漠造林, 转出主要为林地荒漠化; 草地转出主要去向为造林和荒漠化, 而增加主要来源于冰雪覆盖地和荒漠; 未利用地增加主要来源于草地的退化。③研究区土地利用程度较低, 由东南向西北递减, 2000—2010 年, 上游土地利用程度有所降低, 中游大部分地区呈上升趋势。④由于上游山区林地面积的增加, 植被覆盖下土壤的水源涵养量显著增加, 土壤贮水量增加了 0.764×10^8 t。⑤土壤保持量由 1.860×10^8 t 增加到 1.899×10^8 t, 主要原因为草地转化为林地。在气候变化背景下, 黑河流域应控制上游地区人工林面积, 减少林地蒸腾量, 以增加下游可用水量; 适当控制中游地区耕地面积的扩张趋势, 保证湿地、草地等自然生态系统生态用水量, 维持流域山地-绿洲-荒漠系统的稳定, 进而持续发挥生态系统土壤保持等功能。

关键词: 黑河中上游; 土地利用变化; 水源涵养; 土壤保持

Changes in land use and soil and water conservation of the upper and middle reaches of Heihe river basin during 2000—2010

LIU Jinwei¹, JIN Tiantian^{2,*}, LIU Guohua¹, LI Zongshan¹, YANG Rongjin³

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100012, China

3 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100038, China

Abstract: Based on Landsat TM/ETM image data and some other survey materials, this paper analyzed the land use change in the upper and middle reaches of Heihe river basin during 2000—2010. Subsequently, two prominent functions of ecosystem service: water conservation and soil retention were evaluated, from upstream, midstream, as well as the whole region. The findings of this study are summarized as following: (1) The main types of land use is unused land accounting for more than 60% of the total area. In recent ten years, cultivated land, forest land and unused land increased dramatically. By contrast, grassland, water area and snow cover land decreased. (2) The increase of cultivated land was chiefly derived from the conversion of desert and grassland. Desertification on forest land, afforestation on desert and grassland happened at the same time. The total area of forest land showed an ascending trend. The loss of grassland was

基金项目: 西北(甘青新)重点区域和行业发展战略环境评价生态专题资助项目(D237); 国家科技支撑计划资助项目(2012BAC08B01)

收稿日期: 2013-03-01; **网络出版日期:** 2014-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jtt_05@163.com

attributed to the afforestation and desertification, whereas the increment of grassland was ascribed to the conversion from snow cover land and desert. The increase of unused land mainly came from the degradation on grassland. (3) On the whole, the degree of land use was relatively low and displayed a descending trend from the southeast to the northwest. In recent 10 years, the degree of land use dropped in upstream area and ascends in most of the middle reaches of Heihe basin. (4) Owing to the increase of forest land of the upper reaches, water conservation for soil improved significantly. Water storage in soil increased by 0.746×10^8 t. (5) The total amount of soil retention raised from 1.860×10^8 t to 1.899×10^8 t as grassland conversion to forest. Under the background of climate change, some measures should be implemented in order to maintain the stability of the mountain-oasis-desert system and the sustainable of the ecosystem services like soil retention. Firstly, the area of artificial forest should be controlled in the upper reaches which can reduce transpiration and increase the amount of water available. Secondly, in the middle reaches, cultivated land area should be under control to ensure the ecological water consumption, such as grassland and wetlands.

Key Words: the Heihe river basin; land use change; water conservation; soil retention

土地利用变化是全球生态变化研究的一个重要方面,被认为是全球变化的决定因素之一,对全球的生态系统、生物地球化学循环和气候变化以及人类脆弱性有重要影响^[1-2]。在国际地圈与生物圈计划(IGBP, 1987)和国际全球环境变化的人文因素计划(IHDP, 1996)的推动下,国内外众多学者对典型地区土地利用变化的趋势、驱动力以及生态效应进行了大量研究^[3-4]。生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[5],对人类的影响广泛而深远。土地利用的变化改变着生态系统的组成和功能,进而影响生态系统服务的供给功能。近年来,土地利用变化对生态系统服务功能的影响逐渐成为生态学和生态经济学领域研究的热点,而生态系统服务功能的量化评估成为重要的决策依据。生态系统服务功能的量化方法主要有价值评价法和物质量评价法,目前应用较为普遍的是价值量评价法,代表性研究成果为美国生态学家 Costanza 等人的评估方法。该方法在国内也得到了广泛应用,我国众多学者对西北干旱区重点内陆河流域生态系统服务的价值量进行了初步估算^[6-8]。价值量和物质量评估方法各有利弊,在实际工作中应综合考虑,权衡利弊。

黑河流域气候干旱、生态环境极其脆弱,是我国干旱区生态环境问题研究的热点地区。2000 年西部大开发以来,黑河上游实施了一系列生态治理政策、中游启动了水量统一调度方案,社会经济的不断发展及生态政策的逐步落实从不同角度改变着区域的土地利用,对生态系统服务功能有重要的影响。目

前,该流域上游研究集中在气候、山区径流、水文的变化及其带来的生态影响方面^[9-11];中下游地区的研究重点为人工绿洲扩张、天然绿洲退化及土地利用变化带来的环境效应问题^[12-14]等方面。在生态系统服务功能方面,以往研究利用 Costanza^[15]和谢高地^[16]等人的研究结果进行了生态系统服务功能价值量的评价^[6,17-18],而基于物质量评价方法的研究较少^[19]。由于黑河流域水资源短缺、风蚀水蚀严重,水源涵养和土壤保持是该地区生态环境保护和改善的最主要生态系统服务功能,而流域中上游是水源涵养和土壤保持的重要区域;上游祁连山地区具有重要的水源涵养和防止水土流失的作用;中游位于巴丹吉林沙漠的西南部,承担着重要的防风固沙和土壤保持功能。因此,研究黑河中上游地区 2000—2010 年土地利用变化及水源涵养和土壤保持生态系统服务功能物质的变化,对流域重要生态系统服务功能的恢复和改善具有重要的借鉴意义。

本文以黑河中上游地区 2000 和 2010 年土地利用为基础,揭示了 2000—2010 年区域土地利用变化的主要特征,并以此为基础,对区域的水源涵养量和土壤保持量及其变化进行了估算,以期对流域重要生态系统服务功能的保育与提高、生态环境的可持续发展提供理论依据。

1 研究区概况

黑河发源于青海省祁连山区的冰川和积雪带,流经甘肃省进入内蒙古自治区额济纳旗,最终汇入东、西居延海,干流全长 821 km。出山口莺落峡以上

为上游,莺落峡至正义峡为中游,正义峡以下为下游,分别位于祁连山地、走廊平原和阿拉善高原 3 种完全不同的自然地理环境^[20]。本文研究黑河中上游地区(96°08′—101°37′E,37°41′—42°45′N),总面积 9.89 万 km²。上游地区包括青海省祁连县和甘肃省肃南裕固族自治县的部分地区(图 1),以牧业为主;中游地区包括张掖市、嘉峪关市以及酒泉市的肃州区、玉门市、金塔县等部分地区,属灌溉农业经济区。

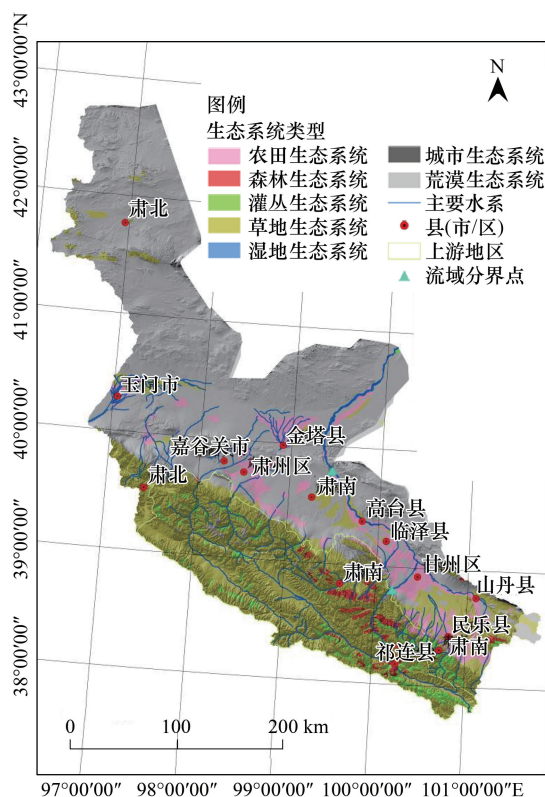


图 1 黑河中上游位置、分区及水系分布图

Fig.1 The location, partition and water system maps of the upper and middle reaches of the Heihe river basin

黑河流域气候干燥,降水量少而集中^[18, 21]。6—8 月份降水量可占年降水量的 63%左右。上游地区气候阴湿寒冷,1960—2010 年的多年平均气温 -2.9—1.1℃,多年平均降水量 294—414mm;中游地区气候干旱,多年平均气温 4.4—8.4℃,由中部向南北两极递减,多年平均降水量 55—200mm,东南明显多于西北。土壤和植被的空间分布差异较大:上游祁连山区土壤属高山寒漠、草甸、草甸草原、草原和森林土壤系列,中游地区主要为灰棕荒漠土;从东南向西北,植被类型分布为高山冰雪冻土带、山区植被带(包括水源涵养林带)、山前绿洲带和荒漠绿洲

带^[20]。黑河流域上游地区植被以山地草地和山地林地为主,植被较好,水量补给充足,是黑河径流的形成区,中游地区以人工绿洲和荒漠绿洲为主,是甘肃省重要的灌溉农业区,上游来水被大量引用,为黑河径流的主要利用区。

2 研究方法

2.1 遥感数据的获取及处理方法

采用 2000 年和 2010 年 Landsat TM/ETM 6—8 月份遥感影像数据(空间分辨率 30m),在 Ecognition、ERDAS IMAGE 8.5 和 ArcGIS 9.3 软件下,进行面向对象的影像分类解译,得到目标流域 2000 年和 2010 年土地利用类型图。解译时首先将两期影像数据进行辐射纠正和几何纠正;其次,根据覆盖区域的影像情况划分影像块,将相同日期和块间差别可忽略的影像块合并成工作块;接着,在 2012 年 7—8 月份从中游到上游进行分类地面样本点采集,在此基础上对照 Google earth 和遥感影像特征进行样本点扩充,随机选取 30%样本点用于解译精度验证;最后,进行样本训练,开展基于支持向量计算法的自动分类,利用精度验证点对结果进行验证。验证结果表明影像总体解译精度为 80%左右,基本可以达到研究所需要求。

土地利用分类系统基于刘纪远等^[22]的分类标准,该标准基于 TM 遥感影像,从遥感监测实用操作性出发,是遥感影像解译中常用的标准。本研究根据西北干旱地区自身的特点,将原有标准进行了修订,最终将土地利用类型划分为 7 个一级类型和 17 个二级类型。一级类为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用土地和冰川积雪覆盖地,为增加生态系统服务计算的准确性将林地进一步划分为高郁闭度林地(覆盖度>30%)、中郁闭度林地(覆盖度在 10%—30%之间)、低郁闭度林地(覆盖度<10%)、防护林地(行道树,居民点内部、周围及绿洲林地)和灌木林地;草地划分为高覆盖度草地(覆盖度>50%)、中覆盖度草地(覆盖度在 20%—50%之间)和低覆盖度草地(覆盖度<20%);水域划分为河渠湖泊水库坑塘等水面及沼泽滩地;未利用地划分为裸土沙地、盐碱地、裸岩和荒漠。在进行流域土地利用变化分析时主要基于一级地类的统计结果,二级地类用于分析土地利用类型的具体来源去向以揭

示变化的原因,以及计算生态系统服务功能物质质量。

2.2 土地利用变化表征方法

运用常用的土地利用类型结构变化、单一土地利用动态度指数、土地利用类型转移矩阵以及土地利用程度综合指数等分析方法^[23],分析了黑河中上游地区土地利用类型变化的过程和趋势。

(1) 单一土地利用动态度指数

也称变化率指数,以土地利用类型的面积为基础,可反映一定时间范围内各土地类型的变化幅度和速度:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

U_a 、 U_b 分别为研究始、末某一地类的面积; T 为研究时段,当用年表示时即为区域此类土地利用类型的年变化率。

(2) 土地利用程度综合指数

该指数及其变化可定量揭示区域土地利用的程度和变化。本文以县市(区)为评价单元,土地利用程度分级及分级指数的设定参照刘纪远等^[24]的研究结果,划分为未利用土地级(未利用地)、林草水用地级(林地、草地和水域)、农业用地级(耕地)和城镇聚落用地级(城乡工矿居民用地)4级:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i, L \in [100, 400] \quad (2)$$

$$A_{\text{未利用地}} = 1, A_{\text{林草水}} = 2, A_{\text{农业用地}} = 3, A_{\text{城镇聚落}} = 4$$

式中, L 为区域土地利用程度综合指数; A_i 为土地利用程度第*i*级的分级指数; C_i 为土地利用程度第*i*级的面积百分比; n 为土地利用程度分级数。

2.3 生态系统服务功能评估方法

2.3.1 水源涵养量估算方法

黑河中上游地区的水源涵养功能主要由上游祁连山区承担,因此,本文估算的水源涵养量只考虑上游地区。其中,林地地表枯枝落叶的蓄积量和持水能力对保持水土、涵养水源具有重要的作用,是反映森林水源涵养能力高低的重要因素之一,同时土壤颗粒间存在大量孔隙,其蓄水能力也是评价土壤涵养水源及调节水分循环功能的重要指标^[25],而高海拔山区的冰川积雪可以直接以固态形式储存水源,但是,由于本文在土地利用类型的划分时未能将冰川和积雪分开,故暂无法计算出冰川和积雪各自的储水量。鉴于此,本文仅估算植被覆盖下的土壤(包括枯枝落叶层和矿质土壤层)的涵蓄水量的变化,土

壤涵养水量的估算:

$$W = W_1 + W_2 \quad (3)$$

式中, W 为水源涵养总量(t); W_1 为枯枝落叶层持水量(t); W_2 为矿质土壤层贮水量(t)。各分量的计算方法:

(1) 枯枝落叶层持水量按最大持水量估算:

$$W_1 = \sum C_i S_i \quad (4)$$

式中, W_1 为枯枝落叶层持水量(t); C_i 为第*i*种植被凋落物的最大持水力(t/km²); S_i 为第*i*种植被类型的面积(km²)

(2) 土壤孔隙的蓄水量分为毛管持水量和非毛管贮水量,一般认为,非毛管孔隙贮水量是评价土壤水源涵养功能的最重要指标之一^[26]。本文土壤的水源涵养量按非毛管孔隙贮水量,以有植被土壤比无植被土壤的多贮水量来表示:

$$W_2 = \sum (P_i - T) \cdot H_i \cdot A_i \cdot \rho_{\text{水}} \quad (5)$$

式中, W_2 为矿质土壤层贮水量(t); P_i 为*i*类植被下土壤的非毛管孔隙度(%); T 为对照裸地土壤非毛管孔隙度(%); H_i 为*i*类植被下土壤的土层厚度(m); A_i 为*i*类植被的面积(km²)。 $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度(1t/m³)。

2.3.2 土壤保持量估算方法

土壤保持量用潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差来表示:

$$A = \sum A_{pi} - A_{ri} \quad (6)$$

式中, A 为土壤保持量; A_{pi} 为*i*类植被的潜在土壤侵蚀量; A_{ri} 为*i*类植被的实际土壤侵蚀量。根据数据的可获得性,上游地区土壤侵蚀以水蚀为主,土壤侵蚀量按侵蚀模数进行估算,中游地区土壤侵蚀以风蚀为主,侵蚀量按风蚀速率估算。

3 结果与分析

3.1 黑河中上游地区土地利用变化

3.1.1 黑河中、上游土地利用结构及动态度变化分析

黑河中上游地区 2000 和 2010 年的土地利用如图 2 所示,黑河中、上游地区生态系统类型的构成差异较大,其土地利用变化及对对生态系统服务功能变化的影响存在较大差异,因此,为了更准确地揭示研究区土地利用变化的空间特征,同时也为了便于

生态系统服务变化的分析,本文将黑河上游、黑河中游地区分开讨论。对比 2000 和 2010 年流域上、中

游地区土地利用变化的分析结果如表 1 所示。

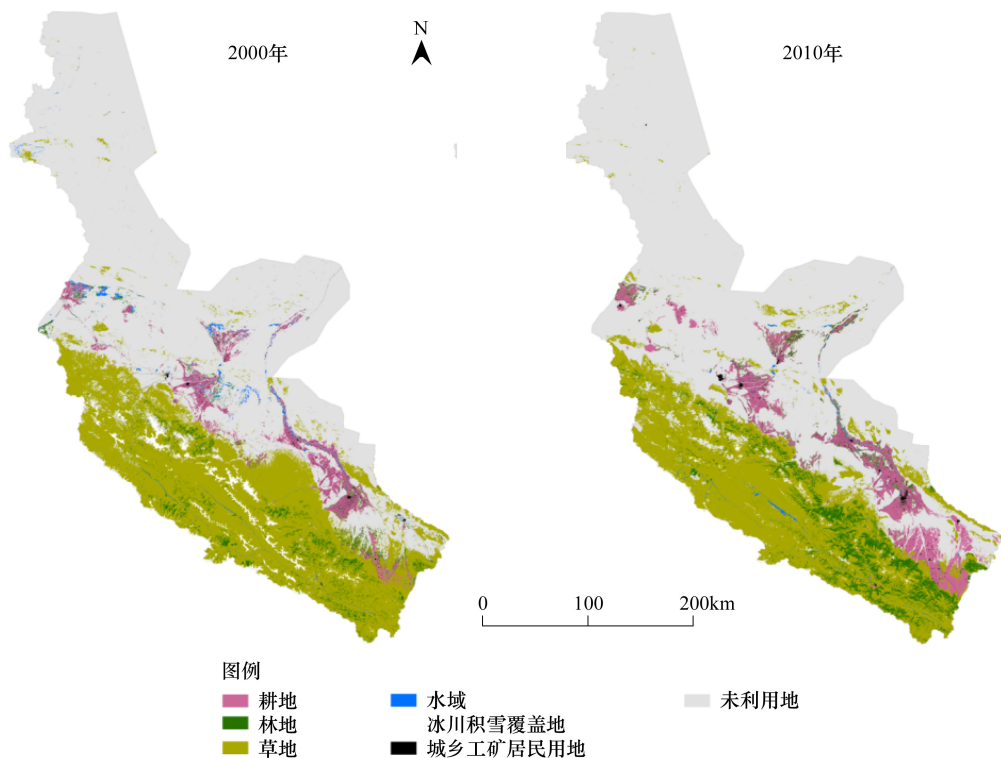


图 2 黑河中上游 2000 和 2010 年土地利用图

Fig.2 Mapping of land use in the upper and middle reaches of Heihe river basin in 2000 and 2010

表 1 黑河中、上游 2000—2010 年各土地利用类型面积及变化

Table 1 Area of land use and dynamic change in the upper and middle reaches of Heihe river basin during 2000—2010		耕地/km ²	林地/km ²	草地/km ²	水域/km ²	冰川积雪覆盖地/km ²	城乡工矿居民用地/km ²	未利用地/km ²
土地利用类型 Land use type		Cultivated land	Forest land	Grassland	Waters	Snow cover land	Build-up land	Unused land
上游 Upper reaches	2000	15.5	1529.1	22581.9	98.0	1388.7	7.9	1205.5
	2010	47.4	3367.0	20420.3	145.1	255.8	8.5	2582.6
	变化量	31.9	1837.9	-2161.6	47.1	-1132.9	0.6	1377.1
	单一土地利用动态度/%	20.58	12.02	-0.96	4.81	-8.16	0.76	11.42
中游 Middle reaches	2000	3734.2	969.0	8098.5	552.5	54.0	388.6	58270.9
	2010	6145.0	1816.9	5462.7	127.3	7.6	460.0	58048.2
	变化量	2410.8	847.9	-2635.8	-425.2	-46.4	71.4	-222.7
	单一土地利用动态度/%	6.46	8.75	-3.25	-7.70	-8.59	1.84	-0.04
研究区 Study area	2000	3749.7	2498.1	30680.5	650.5	1442.6	396.5	59476.4
	2010	6192.4	5183.9	25883.0	272.4	263.4	468.5	60630.8
	变化量	2442.7	2685.8	-4797.5	-378.1	-1179.2	72	1154.4
	单一土地利用动态度/%	6.51	10.75	-1.56	-5.81	-8.17	1.82	0.19

上游地区草地面积占上游总土地面积的 76% 以上,是绝对优势的生态类型。2000—2010 年,草地面积大量减少,减少面积为 2161.6km²,动态度为 0.96%,占研究区土地总面积的比例由 84.18% 下降到 76.12%。耕地、林地、未利用地、水域和城乡工矿居民用地面积增加,其中耕地增加幅度最大,由

15.5km²增加到47.4km²,动态度为20.58%;上游地区是研究区林地分布和增加的主要区域,增加了1837.9km²,动态度为12.02%;未利用地以裸岩和荒漠为主,增加面积为1377.1km²,动态度为11.42%;冰川积雪覆盖地面积的减少幅度较大,动态度为8.16%。

中游地区未利用地面积占中游总土地面积的80%以上,植被盖度极低,林地面积较小。2000—2010年,耕地、林地和城乡工矿居民用地面积增加,其余类型面积减少。在面积增加的类型中,耕地和城乡工矿居民用地是研究区分布和增加的主要区域,其中耕地增加面积为2410.8km²,占研究区新增耕地面积的98.7%,动态度为6.46%;随着防护林的建设,中游地区林地大幅增加,由969km²增加到1816.9km²,动态度为8.75%。在面积减少的类型中,草地的减少量最大,由8098.5km²减少到5462.7km²,动态度为3.25%;水域湿地和冰川积雪覆盖地大幅减少,动态度分别为7.7%和8.59%;未利用地面积减少222.7km²,动态度最小,仅为0.04%。

总体看来,黑河中上游地区土地利用类型以未利用地为主,占研究区总土地面积的比例达60%以上;从植被生态系统来看,草地的分布面积远大于林地的分布面积,是构成植被生态系统的主体。2000—2010年,草地、水域和冰川积雪面积呈减少趋势,减少面积分别为4797.5、378.1km²和1179.2km²,年均递减率分别为1.56%、5.81%和8.17%;耕地、林地、未利用地和城乡工矿居民用地增加,增加面积分

别为2442.7、2685.8、1154.4km²和72km²,年均递增率分别为6.51%、10.75%、0.19%和1.82%。其中,耕地和城乡工矿居民用地面积的大小可用来表示人类对自然生态的干预程度,2000—2010年,耕地和城乡工矿居民用地占土地总面积的比例由4.19%增加到6.73%,说明人类活动对自然生态的干预加剧了。

3.1.2 土地利用类型流入流出分析

黑河中上游2000—2010年土地利用类型的转化过程(表2和图3)可以总结为以下几点:(1)耕地面积大幅增加,主要由中游荒漠和草地转化而来,其转移量分别占耕地面积的13.3%和12.9%;(2)草地面积大量减少,转出量为8569.5km²,主要表现为肃南、山丹及民乐等地的草地转化为林地或退化为未利用地,同时上游冰川积雪覆盖地和中游未利用地转化为草地,补偿了草地的缩减;(3)林地的转变以其它土地类型的转入为主,上游主要为林地和草地的相互转化,其中肃南县林地增加的面积占研究区林地增加总面积的55%以上,中游林地转出和转入的方向主要为未利用地,林地的荒漠化和荒漠造林是林地减少和增加的主要原因;(4)水域和冰川积雪覆盖地面积较小且大幅转出,水域面积有53.8%转变为了未利用地,冰川积雪覆盖地绝大部分被草地(73.9%)和未利用地中的裸岩(11.2%)替换;(5)城乡工矿居民用地转入面积为350.2km²,除玉门市、山丹县等地为减少趋势外,其余地区均增加,主要来源于对未利用地中的沙裸地、荒漠以及耕地的侵占,同

表 2 黑河中上游 2000—2010 年土地利用类型转移矩阵
Table 2 Transferring matrix of land use type in the upper and middle reaches of Heihe river basin during 2000—2010

2000	2010							
	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Waters	冰雪 Snow cover land	城乡工矿 居民用地 Build-up land	未利用地 Unused land	转出量 Reduced area
耕地 Cultivated land/km ²	—	271.8	24.6	6.2		136.3	95.3	534.1
林地 Forest land/km ²	420.8	—	850.0	9.1	0.5	24.0	271.3	1575.7
草地 Grassland/km ²	797.9	3443.6	—	102.7	51.1	21.8	4152.4	8569.5
水域 Waters/km ²	63.4	60.3	57.1	—	0.0	6.3	350.0	537.2
冰雪 Snow cover land/km ²	0.1	4.5	1065.4	0.1	—	0.0	162.3	1232.4
城乡工矿居民用地 Build-up land/km ²	175.0	25.6	8.5	0.8		—	68.2	278.2
未利用地 Unused land/km ²	1519.5	455.6	1766.3	40.2	1.5	161.8	—	3945.0
转入量 New area/km ²	2976.8	4261.5	3772.0	159.1	53.2	350.2	5099.4	16672.1

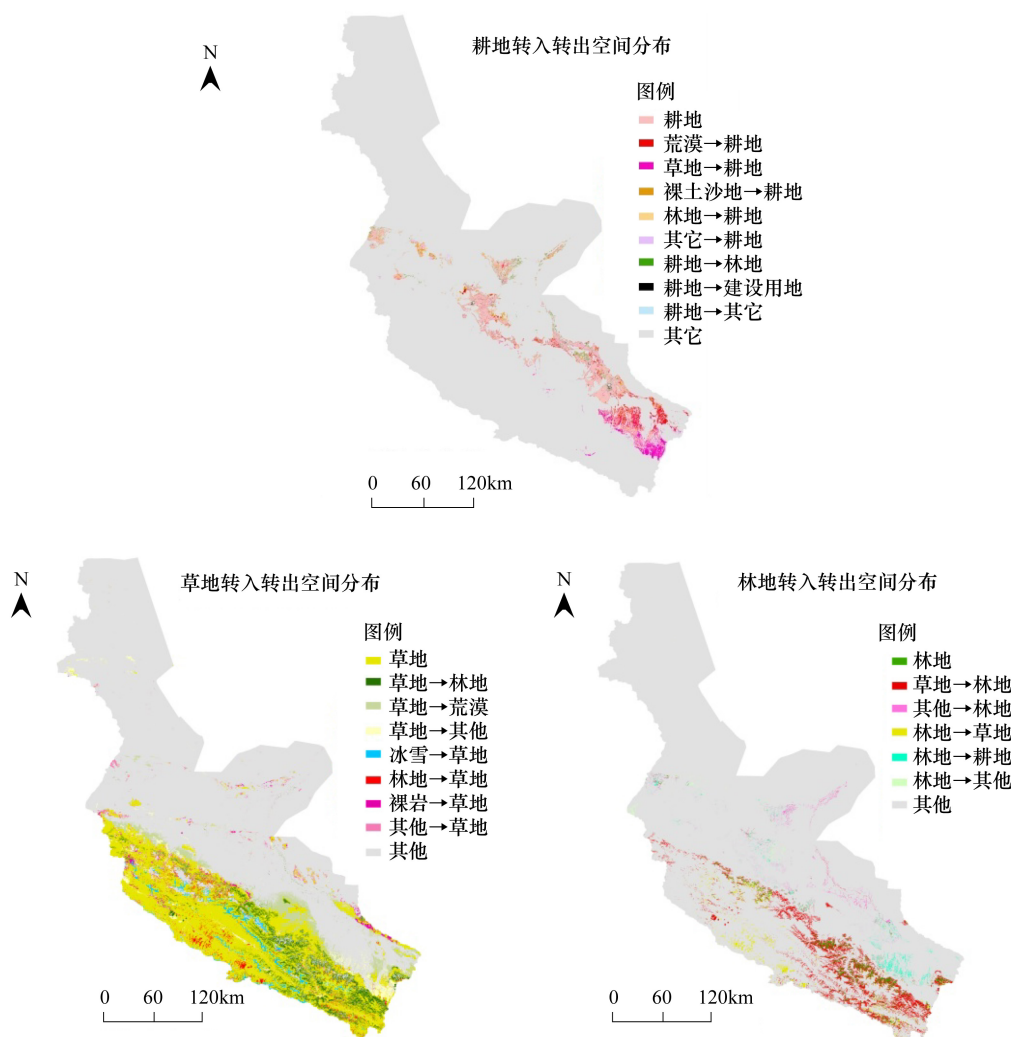


图3 主要土地利用类型转化的空间分布

Fig.3 The spatial distribution of the main land use conversion from 2000 to 2010

时部分城乡工矿居民用地也向其它用地转化。(6)未利用地转化的空间差异性较大,其增加主要分布在肃南和玉门等地,其增加面积占增加总面积的150%,主要来源于低覆盖度草地和沼泽滩地;金塔和肃北两县的未利用地减少。

3.1.3 土地利用程度及变化

根据公式2计算得到黑河中上游2000和2010年各县市(区)的土地利用程度指数(图4),黑河中上游地区的综合土地利用程度较低,土地利用程度综合指数为144.5,从空间上来看,大致表现为由东南向西北逐渐降低的趋势,变化在100.3—213.4之间,这主要是由于南部植被条件较好,中部绿洲农业发达,而北部偏远地区水资源缺乏,人类活动较小。

从土地利用程度的变化来看,黑河中上游地区的土地利用程度整体略有上升趋势,由2000年的

144.5增加到2010年的145.9,表明2000—2010年该区域土地利用处于发展上升期。土地利用程度变化的空间差异性较大,上游地区的土地利用程度降低,而中游除玉门和肃北降低外,其它地区的土地利用程度均为上升趋势,尤其是民乐县,由182.2增加到213.4,其次为山丹和肃州地区。

3.2 黑河中上游地区生态系统服务物质质量变化分析

水源涵养功能的主体为植被和植被覆盖下的土壤,上游祁连山地区是黑河流域的水源地,具有重要的产水和蓄水功能,其水源涵养量的多少关乎着整个流域的可利用水资源量,因此,本文在评价水源涵养功能时重点分析上游祁连山地区植被的水源涵养量,根据土地利用的研究结果,上游植被以林地和草地为主,耕地面积少,故暂不考虑耕地的水源涵养功能。水土保持主要通过植被的保持水土和防风固沙

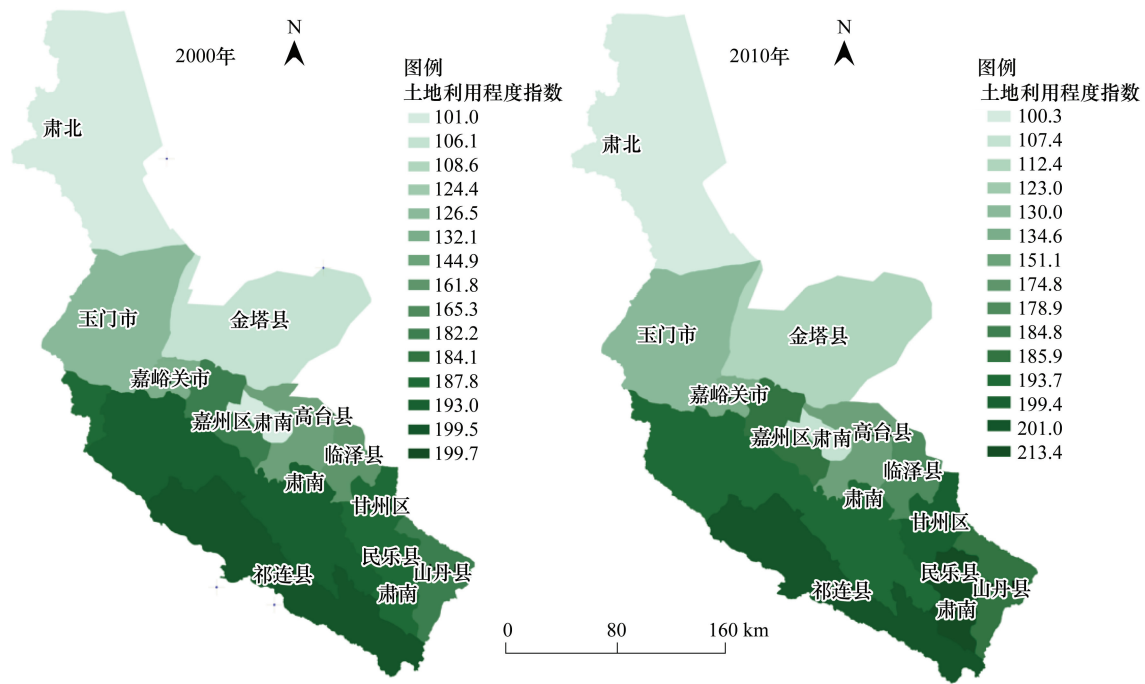


图 4 2000 和 2010 年土地利用程度空间分布
Fig.4 The spatial distribution of land use degree in 2000 and 2010

功能来实现,黑河上游山区降水多,坡度大,植被的土壤保持功能主要体现在防止水土流失方面,而在中游地区,降水稀少,风力大,机械干扰和物理风化作用强烈,土壤侵蚀以风蚀为主,因此,中游地区的土壤保持功能更重要表现在防风固沙。基于此,本文估算的区域土壤保持量包括上游地区植被减少的保持水土量和中游植被的防风固沙量。

3.2.1 水源涵养量的估算

(1) 土壤水源涵养量

根据孙昌平等^[27]及张学龙等^[28]对祁连山地区林地土壤物理性能的研究结果,计算得到上游地区乔木林地(青海云杉林和祁连圆柏林,本文简称林地)和灌木林地枯枝落叶层的持水能力(表3)。假设枯枝落叶层的持水能力不变,计算得到2000年和

2010年黑河上游枯枝落叶层的持水量(表4)。2000年黑河上游林地枯枝落叶层的持水量为 0.151×10^8 t,随着乔木林地和灌木林地面积的大幅增加,到2010年增加到 0.331×10^8 t,提高了1.2倍。

根据成彩霞等^[29]和孙昌平等^[27]在祁连山森林生态站西水试验区的研究结果,计算得到乔木林地、灌木林地和草地0—0.6m土层的平均非毛管孔隙度(表3),进而分别对各植被类型下矿质土壤层的贮水量进行了估算,估算结果见表4。结果表明,黑河上游地区土壤的水源涵养量以矿质土壤层的贮水量为主,占涵养水源总量的87%以上。2000—2010年,黑河上游地区土壤涵养水量大幅增加,2000年蓄水量为 1.625×10^8 t,到2010年增加到 2.568×10^8 t,土壤蓄水量的增加主要是由持水能力较强的林地和灌

表 3 黑河上游土壤物理特征参数

Table 3 Soil physical characteristics parameters of the upper reaches of Heihe river basin

土地类型 Land type	枯枝落叶层持水力 Litter water retention/ ($\times 10^8$ t/ km^2)	土壤非毛管孔隙度 Non-capillary porosity of soil/%	土壤层厚度 Soil thickness/m
林地 Forest land	1.022	14.93	0.6
灌木林地 Shrub land	0.944	13.84	0.6
草地 Grassland	—	7.32	0.6
未利用地 Unused land	—	6.75	0.6

表 4 黑河上游土壤贮水量估算结果

Table 4 Estimates of soil water storage in the upper reaches of Heihe river basin

土地类型 Land type	面积 Area/km ²		枯枝落叶持水量 Quantity of litter water-holding / (×10 ⁸ t)		土壤持水量 Quantity of soil water-holding / (×10 ⁸ t)	
	2000	2010	2000	2010	2000	2010
林地 Forest land	834.1	1686.1	0.085	0.172	0.410	0.828
灌木林地 Shrub land	695	1680.9	0.066	0.159	0.296	0.715
草地 Grassland	22581.9	20420.3	—	—	0.768	0.694
合计 Total	24111	23787.3	0.151	0.331	1.474	2.237

木林地的面积大幅增加带来的,分别增加了 0.505×10⁸t 和 0.512×10⁸t,而草地面积减小导致土壤贮水量减少了 0.074×10⁸t。

3.2.2 土壤保持功能

(1)黑河上游地区土壤保持量

根据汤萃文等^[30]对祁连山北坡东段哈溪保护

站土壤侵蚀模数的研究结果,计算得到上游地区乔木林地、灌木林地、草地和耕地的平均侵蚀模数,代入公式 6,得到各植被类型的土壤保持量。其中,潜在侵蚀能力按照裸地的侵蚀能力(9014t km⁻² a⁻¹)来估算。

表 5 黑河上游地区不同土地类型土壤保持量估算结果

Table 5 Estimation results of soil conservation of different land use type in the upper reaches of Heihe river basin

土地类型 Land type	林地 Forest land	灌木林地 Shrub land	耕地 Cultivated land	草地 Grassland	合计 Total
土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus/(t km ⁻² a ⁻¹)	302	402	2448	2556	
2000 年土壤保持量 Quantity of soil conservation of 2000/(×10 ⁴ t)	726.7	598.5	10.2	14583.4	1.592
2010 年土壤保持量 Quantity of soil conservation of 2010/(×10 ⁴ t)	1468.9	1447.6	31.1	13187.4	1.614

从表 5 可以看出,2000—2010 年,黑河上游地区的土壤保持量增加了 216.2×10⁴t,土壤保持量略有提高。其中,由于林地和耕地面积的增加,林地、耕地的土壤保持量都呈增加趋势,分别增加 1591.3×10⁴t 和 20.9×10⁴t,同时草地荒漠化导致土壤保持量减少 1396×10⁴t,大大削弱了上游地区土壤保持量的增加。

(2)黑河中游地区土壤保持量

黑河中游地区的土壤侵蚀类型主要为风蚀,根据马海艳等^[31]对黑河中游山前平原区耕地、草地和荒地土壤侵蚀速率的研究结果,按照公式 6,对中游地区耕地、草地和林地的土壤保持量进行了估算。其中,潜在土壤侵蚀速率按照荒地的侵蚀速率(5341.6 t km⁻² a⁻¹)估算,防护林地和灌木林地侵蚀速率的估算按照荒地侵蚀速率的 15.7%来估算^[32]。估算结果见表 6。

表 6 黑河中游地区不同土地类型土壤保持量估算结果

Table 6 Estimation results of soil conservation of different land use type in the middle reaches of Heihe river basin

土地类型 Land type	耕地 Cultivated land	草地 Grassland	林地 Forest land	合计 Total
土壤侵蚀速率 Soil erosion rate/(t km ⁻² a ⁻¹)	3905	3231.3	838.6	
2000 年土壤保持量 Quantity of soil conservation of 2000/(×10 ⁴ t)	536.4	1709	436.3	2681.8
2010 年土壤保持量 Quantity of soil conservation of 2010/(×10 ⁴ t)	882.8	1152.8	818.1	2853.7

由上表可见,2000—2010 年,黑河中游地区的土壤保持量由 2681.8×10⁴t 增加到 2853.7×10⁴t,增加了 171.9×10⁴t。其中,林地和耕地的土壤保持量分别增加了 381.8×10⁴t 和 346.3×10⁴t,而草地面积的

减少导致土壤保持量大量减少,减少量为 556.2×10⁴t。

(3)黑河中上游地区土壤保持总量

黑河中上游地区土壤保持功能提供的主体为草

地,草地的土壤保持量占土壤保持总量的 75%以上,2000—2010 年草地面积的大幅减少大大降低了黑河中上游地区的土壤保持量,草地的减少导致土壤保持量减少 $1952.2 \times 10^4 \text{t}$,而林地和耕地的增加提高了土壤的保持量,弥补了草地面积减少损失的土壤保持量,2000—2010 年,黑河中上游土壤保持量呈略有提高的趋势,土壤保持量由 2000 年的 $18600.6 \times 10^4 \text{t}$ 增加 2010 年的 $18988.7 \times 10^4 \text{t}$,增加了 $388.1 \times 10^4 \text{t}$ 。

4 结论与讨论

4.1 不确定性分析

冰川积雪面积的变化对季节和随机气象事件的发生非常敏感,尤其是积雪面积的变化具有较大的时间波动性和不确定性,这使得利用遥感影像数据进行冰川积雪变化的研究存在一定的随机性和不确定性。有关黑河上游地区冰川积雪面积及其变化的研究,各学者得到的研究结果也存在很大差异,但大都表明夏季冰川积雪面积的年际变化为减少趋势^[33-34]。本研究中得到 2010 年冰川积雪面积比 2000 年大量减少,主要转变为草地和裸地,这一方面可能与两期影像数据的拍摄时间不同,导致冰雪的消融程度不同有关,也存在 2000 年影像图片拍摄于下雪之后等的可能性。

4.2 黑河流域土地利用变化驱动力分析

气候变化和人类活动流域土地利用变化的两大驱动力,两大驱动力相互影响,共同作用。

近年来黑河流域气温上升速率高于北半球的平均升温率^[35],引发流域土地利用的显著变化。冰川积雪面积大量消减,主要是由气候变暖导致的,根据祁连、野牛沟、托勒 3 个国家级气象站 1960—2010 年的气象资料(来源于中国气象科学数据共享服务网)分析,近 50 年来上游地区气温呈极显著上升趋势,上升速率为 $0.034^\circ\text{C}/\text{a}$,而从气温的年代变化来看,2000—2010 年的年均温比 1990—2000 年的年均温高 0.6°C ,气温的升高加速了冰川积雪的消融。王璞玉等人^[36]的研究结果表明 1950 年/1970 年—2003 年该流域冰川面积缩小了 29.6%,而本研究结果表明 2000—2010 年中上游冰川面积年均缩小约 8%,未来气候持续变暖的条件下该流域冰川面积将持续缩小。气温升高同时也会促使冰川积雪覆盖地向草地转化、草地向林地转化。

此外,水域和湿地面积大度缩减,这是气候变化和人类活动共同作用的结果。1960 年以来,上游地区气温极显著升高的同时降水量的增加趋势也较为显著,年均增长 1.16mm ,同时,根据山丹、张掖、高台、酒泉、金塔、鼎新、玉门镇、马鬃山 8 个气象站近 50 年来的气象资料分析,黑河中游地区降水量有所增加但趋势不显著,年均增加 $0.47\text{—}0.67\text{mm}$ (平均年增长率为 0.31mm),而气温与上游地区一样呈极显著上升趋势,年均升高 $0.028\text{—}0.053^\circ\text{C}$ (平均年升高率为 0.036°C)。由于降水量增加幅度较小,不足以平衡气温升高带来的蒸发量增加,加上人口增长带来需水量增加以及调水政策的实施,导致地表水量进一步减少、地下水位下降,生态用水减少,由于缺少水源补给,部分河流、沼泽和湖泊干涸,大面积湿地萎缩,荒漠化加剧。马鸿勇等人的研究^[37]表明,气候变化使黑河流域地表向干旱化发展的趋势加快,加上人类活动的影响,2001—2008 年黑河流域中上游湿地面积累计减少了 166.7km^2 ,而本研究结果表明 2000—2010 年中上游水域和湿地面积减少了 378.1km^2 ,其中有 350.0km^2 转变为了未利用地,主要是荒漠和裸土沙地。

黑河流域引发土地利用变化的人为因素主要是人类的开发活动和近年来实施的生态治理措施。随着人类影响的深入,城乡工矿居民用地增加,中游人类活动密集区耕地面积大幅度增加,大量的荒漠和草地被开垦为耕地,尤其是民乐和山丹两县,其耕地增加的面积分别占研究区耕地增加总面积的 29.1%和 30.1%。2000—2010 年,黑河上游地区实施了一系列生态治理措施,如天然林封育、草地围栏封育、人工造林、黑土滩沙化治理等,这些工程的实施增加了上游和中游地区林地面积,但是由于流域水资源消耗和降雨量的减少部分地区林地和草地呈现退化趋势,荒漠造林和林地荒漠化是人类和环境共同影响的结果。

4.3 土地利用变化对流域水土保持功能的影响

黑河流域干旱缺水、生态环境脆弱,水源涵养和土壤保持功能的发挥对流域生态环境稳定性具有重要作用。在气候变化和人类活动共同作用下,该流域土地利用变化在 2000—2010 年发生了显著变化,这些变化影响区域的物质循环和能量流动,进而影响到水源涵养和土壤保持服务功能的发挥。

2000—2010 年,黑河中上游地区土壤储水量显著增加,主要原因为林地的大面积增加。然而,冰川面积缩小、林地和耕地面积的持续增加可能消耗更多的水资源,因此在流域气候暖干化背景下,未来该地区水资源短缺将会持续加重。

2000—2010 年黑河中上游地区土壤保持力呈现增加趋势,主要原因为林地和耕地面积的增加。然而应该看到,在人类活动用水量增加的情况下,生态用水进一步被挤占,这将直接导致原来的水域,包括河流、湖泊、沼泽滩地的面积迅速减少,地下水位持续降低^[38],进而影响植被尤其是中、低覆盖度草地以及依靠地下水维持生存的非灌区植被的退化,进而削弱天然植被的稳定性,在风力作用下容易造成潜在荒漠化,土壤保持功能可能受到影响。

4.4 黑河流域生态系统服务功能改善建议

针对黑河流域水源涵养和土壤保持功能的提升,提出以下建议:

(1)黑河中上游地区林地增加虽然增强了区域的水源涵养和土壤保持功能,但由于林地的蒸腾作用较强,气候暖干化,在黑河流域比较缺水的情况下需要适度发展。

(2)中游地区应严格控制耕地的大规模扩张趋势,确定适宜的耕地规模,保证生态用水的供给,保证黑河流域山地-绿洲-荒漠系统的稳定和可持续发展,实现生态系统服务功能的持续发挥。

(3)黑河流域湿对中上游土地利用变化较为敏感,同时湿地也是其它生态系统健康状况的重要指示,保护湿地对维护流域内生态稳定,对土壤保持功能的实现具有重要意义。为此,应积极开展湿地生态保护,对湿地进行封育保护,减少人为干扰,同时保护周围生态环境稳定性。必要时可逐渐退耕还湿或改为人工湿地,保证流域湿地面积的稳定。

致谢:中国科学院生态环境研究中心伍星老师和汪亚峰老师帮助写作,特此致谢。

References:

- [1] Li J, Sang G S, Liu X Y. Review of the evolution of ecological environment in the Heihe river basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(6): 210-214, 219-219.
- [2] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [3] Dale V H. The relationship between land-use change and climate change. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 753-769.
- [4] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, Zhuang D F, Zhang Z X, Zhang W, Tang X M, Deng X Z. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: an analysis based on Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(4): 442-456.
- [5] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613.
- [6] Huang X, Chen Y N, Ma J X. Analysis of the ecosystem services value of the typical river basin in desert areas of Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1364-1376.
- [7] Ma G J, Lin D. Evaluation on economic value of ecosystem services in Shiyang river basin. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(6): 1173-1177.
- [8] Su X L, Kang S Z, Tong L. A dynamic evaluation method and its application for the ecosystem service value of an inland river basin: A case study on the Shiyanghe river basin in Hexi corridor of Gansu province. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 2011-2019.
- [9] Dang S Z, Liu C M, Wang Z G, Wu M Y. Spatio-temporal distribution characteristics of snow cover in the upper reaches of Heihe river basin over the past 10 years and the variation trend. *Resources Science*, 2012, 34(8): 1574-1581.
- [10] Li Z L, Xu Z X. Characteristics of runoff time series for the upper reaches of Heihe river basin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(9): 51-56.
- [11] Li Z L, Wang X J. Shift trend analysis of meteorological time series in the upper and middle reaches of Heihe river basin. *Geographical Research*, 2011, 30(11): 2059-2066.
- [12] Li C Z, Yu F L, Liu J, Yan D H, Zhou T. Research on land use/cover change and its driving force in midstream of the Heihe mainstream basin during the past 20 years. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 353-363.
- [13] Li N, Yang T B. Research on LUCC in middle reaches of Heihe river basin after water redistribution. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(2): 223-226.
- [14] Xiao S C, Xiao H L, Song Y X, Zhou M X, Luo F. Water-Land resources utilization and environmental evolution in middle to lower reaches of Heihe river basin during the past 2000 years. *Journal of Desert Resources*, 2004, 24(4): 405-408.
- [15] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25

- (1): 3-15.
- [16] Xie G D, Lu C X, Leng Y F, Zheng D, Li S C. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.
- [17] Zhang Z Q, Xu Z M, Wang J, Cheng G D. Value of the ecosystem services in the Heihe river basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 360-366.
- [18] Wang X H, Zhang Z Q. Effect of land-use change on ecosystem services value in Heihe river basin. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 608-611.
- [19] Han Y X, Tuo X S, Gao J X, Gao X T. Ecosystem services radiation of significant eco-function area in the lower reaches of Heihe river. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(19): 5185-5193.
- [20] Cheng G D. Heihe River Basin: The Integrated Management of Water-Ecology-Economic System Research. Beijing: Science Press, 2009.
- [21] Liu Z. The Change of Water Resources in Heihe River basin and Its Influence of LUCC [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2011.
- [22] Liu J Y. Study on National Resources & Environment Survey and Dynamic Monitoring Using Remote Sensing. Beijing: China Science and Technology Press, 1996.
- [23] Zhu H Y, Li X B. Discussion on the index method of regional land use change. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 643-650.
- [24] Wang S Y, Liu J Y, Zhang Z X, Zhou Q B, Zhao X L. Analysis on spatial-temporal features of land use in China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 631-639.
- [25] Chai Y F, Wang E H, Chen X W, Wang Q B, Zhou Y Y. Study on soil water-holding capability and permeability of black soil under vegetation restoration. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1): 60-64, 73-73.
- [26] Han Z Q, Wang L H. Water conservaion capacities of soils with major forest types in mountainous regions of east Liaoning province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(3): 237-241.
- [27] Sun C P, Liu X D, Lei L, Wang Y K, Zhang X L. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Qilian mountains. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(4): 68-72, 77-77.
- [28] Zhang X L, Cheng C X, Jing W M, Miao Y X, Luo L F. Hydrological and ecological effects of forest soil in Qilian Mountain. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2007, 32(2): 5-9.
- [29] Cheng C X, Zhang X L, Liu Z B, Jin M, Wang S L. Analysis on physical properties of soil moisture content in Xishui forest zone of Qilian Mountain. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2007, 28(4): 33-38.
- [30] Tang C W, Zhang Z M, Xiao D N, Yang G J. Environmental factor characteristics of soil erosion in the upper reaches of Shiyang River in the Qilian mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 105-113.
- [31] Ma H Y, Wang G X, Cheng G D, Wang J D. Effect of soil erosion by LUCC in plain before mountain in middle Part of Heihe river. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 88-92.
- [32] Bai M Y, Bai X. Investigation on eco-economical benefits of the forest system for windbreak and sand-fixation in Hexi corridor. *Ecological Economy*, 1992, (3): 41-44.
- [33] Dang S Z, Liu C M, Wang G Z, Wu M Y. Analyses on temporal variations of snowmelt runoff time in the upper reaches of Heihe River and its climate causes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, (4): 920-926.
- [34] Hu B S, Cao G C, Ma Y F. Landscape Pattern Analysis of the Source of Heihe. *Value Engineering*, 2011, 30(2): 3-4.
- [35] Zhang K, Wang R Y, Han H T, Wang X P, Si J H. Hydrological and water resources effects under climate change in Heihe river basin. *Resources Science*, 2007, 29(1): 77-83.
- [36] Wang P Y, Li Z Q, Gao W Y, Yan D H, Bai J Z, Li K M, Wang L. Glacier changes in the Heihe river basin over the past 50 Years in the context of climate change. *Resources Science*, 2011, 33(3): 399-407.
- [37] Ma H Y, Zhang F, Zhang J. Effect of climate change on t wetland ecological environment in Heihe river basin in recent 51 years. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, 1(12): 99-103.
- [38] Chen R S, Kang E S, Yang J P, Zhang J S, Zhao W Z. Seasonal groundwater level variance in midstream of Heihe mainstream basin. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(5): 36-43.

参考文献:

- [1] 李静, 桑广书, 刘小艳. 黑河流域生态环境演变研究综述. 水土保持研究, 2009, 16(6): 210-214, 219-219.
- [5] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [6] 黄湘, 陈亚宁, 马建新. 西北干旱区典型流域生态系统服务价值变化. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1364-1376.
- [7] 马国军, 林栋. 石羊河流域生态系统服务功能经济价值评估. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1173-1177.
- [8] 栗晓玲, 康绍忠, 佟玲. 内陆河流域生态系统服务价值的动态估算方法与应用——以甘肃河西走廊石羊河流域为例. 生态学报, 2006, 26(6): 2011-2019.
- [9] 党素珍, 刘昌明, 王中根, 吴梦莹. 近 10 年黑河流域上游积雪时空分布特征及变化趋势. 资源科学, 2012, 34(8): 1574-1581.
- [10] 李占玲, 徐宗学. 黑河上游山区径流变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9): 51-56.
- [11] 李占玲, 王小娟. 黑河中上游气象要素单调变化趋势分析. 地

- 理研究, 2011, 30(11): 2059-2066.
- [12] 李传哲, 于福亮, 刘佳, 严登华, 周婷. 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. 自然资源学报, 2011, 26(3): 353-363.
- [13] 李娜, 杨太保. 黑河分水后中游地区 LUCC 监测. 中国沙漠, 2008, 28(2): 223-226.
- [14] 肖生春, 肖洪浪, 宋耀选, 周茅先, 罗芳. 2000 年来黑河中下游水土资源利用与下游环境演变. 中国沙漠, 2004, 24(4): 27-30.
- [16] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [17] 张志强, 徐中民, 王建, 程国栋. 黑河流域生态系统服务的价值. 冰川冻土, 2001, 23(4): 360-366.
- [18] 王新华, 张志强. 黑河流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 生态环境, 2004, 13(4): 608-611.
- [19] 韩永伟, 拓学森, 高吉喜, 高馨婷. 黑河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益. 生态学报, 2010, 30(19): 5185-5193.
- [20] 程国栋. 黑河流域: 水-生态-经济系统综合管理研究. 北京: 科学出版社, 2009.
- [21] 刘喆. 黑河流域水资源变化及其对土地利用变化的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2011.
- [22] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [23] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.
- [24] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 周全斌, 赵晓丽. 中国土地利用时空特征分析. 地理学报, 2001, 56(6): 631-639.
- [25] 柴亚凡, 王恩姮, 陈祥伟, 王庆彬, 周一杨. 植被恢复模式对黑土贮水性能及水分入渗特征的影响. 水土保持学报, 2008, 22(1): 60-64, 73-73.
- [26] 郝占庆, 王力华. 辽东山区主要森林类型林地土壤涵养水性的研究. 应用生态学报, 1998, 9(3): 237-241.
- [27] 孙昌平, 刘贤德, 雷蕾, 王有科, 张学龙. 祁连山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持通报, 2010, 30(4): 68-72, 77-77.
- [28] 张学龙, 成彩霞, 敬文茂, 苗毓鑫, 罗龙发. 祁连山森林土壤的水文生态效应. 甘肃林业科技, 2007, 32(2): 5-9.
- [29] 成彩霞, 张学龙, 刘占波, 金铭, 王顺利. 祁连山山西水林区土壤水分物理性质特征分析. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2007, 28(4): 33-38.
- [30] 汤萃文, 张忠明, 肖笃宁, 杨国靖. 祁连山石羊河上游山区土壤侵蚀的环境因子特征分析. 冰川冻土, 2012, 34(1): 105-113.
- [31] 马海艳, 王根绪, 程国栋, 王军德. 黑河中游山前平原区土地利用变化对土壤侵蚀的影响. 水土保持学报, 2005, 19(3): 88-92.
- [32] 白明英, 白星. 河西走廊防风固沙林体系生态经济效益调查研究. 生态经济, 1992, (3): 41-44.
- [33] 党素珍, 刘昌明, 王中根, 吴梦莹. 黑河流域上游融雪径流时间变化特征及成因分析. 冰川冻土, 2012, (4): 920-926.
- [34] 胡冰殊, 曹广超, 马燕飞. 黑河源区景观格局空间变化分析. 价值工程, 2011, 30(2): 3-4.
- [35] 张凯, 王润元, 韩海涛, 王小平, 司建华. 黑河流域气候变化的水文水资源效应. 资源科学, 2007, (1): 77-83.
- [36] 王璞玉, 李忠勤, 高闻宇, 颜东海, 白金中, 李开明, 王林. 气候变化背景下近 50 年来黑河流域冰川资源变化特征分析. 资源科学, 2011, 33(3): 399-407.
- [37] 马鸿勇, 张峰, 张洁. 近 51 年气候变化对黑河流域湿地生态环境的影响. 气象与环境研究, 2010, (12): 99-103.
- [38] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 张济世, 赵文智. 黑河干流中游地区季平均地下水位变化分析. 干旱区资源与环境, 2003, 17(5): 36-43.