

中国东北区水资源量天然可再生能力分异及其对土地利用变化的响应

严登华¹, 王浩¹, 刘权², 王建华¹

(1. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100044; 2. 清华大学水文水资源研究所, 北京 100084)

摘要: 从水循环的角度对水资源的可再生能力进行表征, 并在 GIS 技术支持下, 对中国东北区天然水资源量可再生能力时空分异进行了系统剖析; 并结合东北区 1986 ~ 2000 年间的土地利用变化, 揭示了东北区天然水资源可再生能力分异对土地利用变化的响应. 1956 ~ 2001 年间, 东北区多年平均水资源量为 1 991.52 亿 m^3 , 具有显著的时空变化特征; 且水资源变化具有 33a、11a 和 4a 周期. 1980 ~ 2001 年间, 东北区水资源可再生能力呈现出下降趋势, 下降幅度和年际间的变化强度具有显著的空间分异特征. 水资源可再生能力与土地利用的耦合变化表明, 需在分布式生态-水文机理剖析的基础上, 对中国东北区的土地利用格局进行科学调整, 以使得在人类活动剧烈干扰的环境背景下, 水资源的可再生能力仍能维持在一个较高的水平上.

关键词: 水资源; 天然可再生能力; 土地利用变化; 中国东北区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)01-0094-06

Spatial and Temporal Variation of the Natural Reproducible Ability of Water Resource in the Northeast Part of China and Its Response to the Land Use Change

YAN Deng-hua¹, WANG Hao¹, LIU Quan², WANG Jian-hua¹

(1. China Institute of Water Resource and Hydro-Power Research, Beijing 100044, China; 2. Hydrology and Water Resource Institute Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With respect to the water cycling, the natural reproducible ability of water resource (NRAWR) was expressed, and the spatial and temporal differences of NRAWR in the northeast part of China were anatomized systematically with the GIS techniques. Furthermore, the response of NRAWR in the northeast part of China to land use changes was described based on land use patterns of the northeast part of China in 1986, 1996 and 2000. Water resource in the northeast part of China has the distinct spatial and temporal variation during the period from 1956 to 2001 with the multi-year volume of 199.152 billion m^3 , and the temporal change of NRAWR has 33-year, 11-year and 4-year cycles. In the phase from 1980 to 2001, the NRAWR in the northeast part of China has the descending trend, and the yearly variation range and intensity have marked spatial evolutionary features. The coupling change of NRAWR and land use change shows that, in order to maintaining an higher NRAWR level under the condition of the acute anthropic interferes in the northeast part of China, the land use pattern should be adjusted based on the distributed eco-hydrological mechanism analysis.

Key words: water resource; natural reproducible ability; land use change; northeast part of China

水资源的可再生性是指在自然和人类活动综合作用下, 通过水循环(包括天然循环和人工侧支循环)过程, 区域(或流域)内的水资源能够得到不断补充和更新的特征; 它是水资源的基本属性之一. 根据水循环过程可将水资源的可再生性划分为自然(天然)可再生性和社会可再生性. 对变化环境中水资源的可再生能力进行科学度量, 并对其演化分异机理进行系统揭示是实现水资源持续利用的关键所在, 也是当前水资源研究中的一个全新课题. 水资源的可再生性可通过水资源的可再生能力得到科学表征^[1~12].

当前水资源可再生性及可再生能力的研究刚刚起步, 主要是从天然水资源量的角度来量化水资源的可再生性, 具体有以下几种理解和做法: ①用传统

意义上水资源的可更新量(即水资源量)作为水资源可再生性的表征值^[7]; ②以单位面积上水资源量作为水资源量的可再生能力, 也就是水资源量或径流深度的概念^[9]; ③用水体的更新周期(或更新速率)来表达水资源量的可再生速率^[10]; ④根据河流蓄水量的变化量与最大可变量为基础建立的水资源量的可再生性指数^[11]. 总体上看, 第 2 种度量方法是对第 1 种度量方法的继承和发展, 能更好地进行不同区域之间水资源量可再生性的比较; 第 3 种度量方法更大程度上强调水资源量重现的周期性(或重现

收稿日期: 2003-12-18; 修订日期: 2004-04-26

基金项目: 中国工程院咨询项目; 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-SW-19-1-02)

作者简介: 严登华(1976~), 男, 安徽省太湖县人, 博士, 在站博士后. 主要从事生态水文学与水资源水环境研究.

性);第4种度量方法是从水循环的更深层次上来加以揭示,具有更加丰富的内涵;但这4类方法主要是针对水资源量变化的最终结果,为能更科学地揭示水资源可再生性的内涵,需从水资源演化的过程与结果2个角度来量化水资源可再生性。

中国东北区水资源问题十分严重,水资源已经成为区域社会经济发展和自然保护的瓶颈。本文将从水循环的角度来表征水资源的可再生能力,并在此基础上初步探讨水资源的可再生能力分异对土地利用变化的响应。

1 区域环境背景及水资源分区

中国东北区主要包括辽宁省、吉林省和黑龙江省的全部以及内蒙古自治区东部四盟(市)(呼伦贝尔市、兴安盟、哲里木盟和赤峰市),地理坐标为(115°30′~135°20′E,38°43′~53°30′N);土地总面积为124.4万km²;2000年末全区总人口为11765.29万人。

东北区西北和东面被中、低山所环绕,中间是向南部开敞的大平原,西面是辽西山地和大兴安岭山脉,北面是伊呼里山和小兴安岭,东面是老爷岭、长白山脉、千山山脉,这三面群山都不大高,海拔只有800~1500m;在三面群山的外部,环绕着高平原、谷地、低地、海滩等地貌类型。在地貌格局的控制下,发育着黑龙江、松花江、辽河、鸭绿江、图们江和绥芬河等6大水系;诸水系河流众多,集水面积大于1000km²以上的河流有290多条。在这种地貌格局和水系分布的背景下,将中国东北区划分为黑龙江区、辽河区2个1级水资源区;其中黑龙江区进一步划分为乌苏里江(包括绥芬河)、松花江干流区、嫩江、黑龙江干流、额尔古纳河、第二松花江等6个2级水资源区;辽河区又划分为鸭绿江、西辽河、图们江、辽宁沿海诸河(包括辽东、辽西沿海诸河)、辽河中下游和东辽河等6个2级水资源区。

2 材料与方法

2.1 水资源量可再生能力数学表征

从水循环的角度分析,降水在地球表层的再分配形成了流域内的水资源。因此,流域水资源的可再生能力是降水和下垫面(地球表层)将降水转化成水资源的能力的函数:

$$R_w = f(p, us) \quad (1)$$

式中: R_w 为流域水资源可再生能力, p 为降水, us 为下垫面将降水转化成水资源的能力。

对于 us , 可用产水系数来表示, 即:

$$Y_w = \frac{W}{p} \quad (2)$$

式中: Y_w 为产水系数, W 为水资源量, p 为降水量。

由于水资源可再生能力的变化受到降水和 Y_w 的动态变化影响, 因此有:

$$R_{wi} = a \cdot \frac{p_i}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i} + b \cdot \frac{Y_{wi}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{wi}} \quad (3)$$

式中, i 为时段序号。

对于常数 a 和 b 的赋值, 即降水和流域的产水量对水资源可再生能力作用程度的率定, 可采用专家打分和主成分分析(PCA)等方法获得。在对东北区的研究中, 均取1/2。

2.2 土地利用数据源和分析方法

土地利用类型的源信息是1986年、1996年和2000年Landsat TM数字图像, 波段组成为4, 3, 2(RGB), 地面分辨率为30m, 时相为6~10月份。图像经过几何纠正选择、坐标变换和增强处理后, 确立解译标志和解译精度, 在GIS工作平台上通过人工交互式, 采用直接解译法、图像处理法、信息融合法和逻辑推理法进行解译。本文采用国家土地遥感样查, 2级分类系统进行分类, 1级分为耕地(1)、林地(2)、草地(3)、水域(4)、居民地与工交建设用地(5)和未利用地(6)等6类, 2级分类共有31个类型。通过野外调绘、核实, 此次遥感解译精度为96.7%。

2.3 数据处理方法与处理平台

采用Kendall秩相关系数法对水资源可再生能力的时间变化趋势进行分析; 采用功率谱密度分析方法(Power Spectral Density)对其周期性进行分析。

土地利用程度是在自然和人类活动综合作用下土地利用动态变化的综合表征。土地利用类型分成4级: 未利用土地级、粗放利用土地级、集约用地级和城镇、聚落用地。对土地利用级按土地覆被类型赋予不同的值, 则得到4种土地利用程度的分级指数。^[13]

数据的空间分析是在ArcGIS8.3平台上编制相关的AML程序完成的; 数值分析是在Matlab6.0和Spss13.0等软件包的支持下完成的。

3 结果与讨论

3.1 水资源与土地利用分布态势

3.1.1 水资源分布概况

1956 ~ 2001 年间, 东北区多年平均降水量为 510.06 mm, 折合为 6 367.99 亿 m^3 ; 平均地表水水资源量为 1 701.17 亿 m^3 ; 平均水资源总量为 1 991.52 亿 m^3 . 东北地区水资源总量属于中等水平, 人均占有量相当于全国平均量的 78.1 %.

东北地区河川径流主要由降水转化, 水资源量的变化与降水波动相一致. 从水资源的年际变化看, 上个世纪 90 年代东北区水资源的变幅要显著高于

其在 80 年代的变幅, C_v 分别为 0.28 和 0.16. 特别是 1995 年以来, 东北区在连续经历 3 年的平水年后跨入特丰水年(1998 年), 继而又连续 3 年经历了枯水年, 使得东北地区的水资源安全面临严重挑战(图 1a). 东北区水资源的年际变化随着降水的波动具有一定的周期性, 功率谱密度分析表明, 东北区水资源变化具有显著的 33a、4a 和 11a 周期, 对应的频率分别为 0.03、0.28 和 0.09(图 1b).

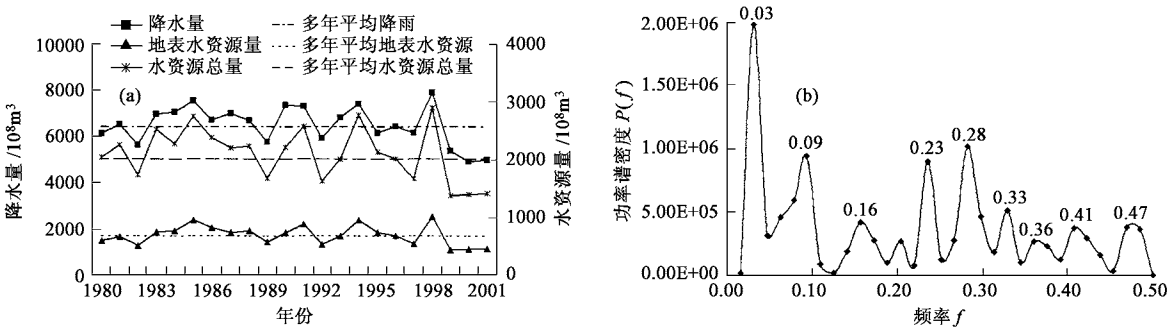


图 1 东北区水资源的年际变化及功率谱密度分布

Fig.1 The yearly variation and the power spectrum density of water resource in the Northeast China

产水模数是单位时间单位面积上所产生的水资源量, 该模数能有效表征水资源的空间分异. 1956 ~ 2001 年间东北区平均产水模数为 16.53 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 黑龙江区略大于辽河区, 分别为 16.76 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 15.97 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 总体上体现出水资源“北多南少”的特点. 就黑龙江区而言, 第二松花江区的产水模数最大, 达到 25.40 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 额尔古纳河区最小, 仅为 9.45 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 水资源较为贫乏. 辽河区的鸭绿江区的产水模数最大, 达到 50.37 万 $\text{m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 水资源十分丰富, 然而, 西辽河区的水资源十分匮乏, 产水模数仅为鸭绿江区的 11 %.

3.1.2 土地利用及动态变化概况

整体上看, 东北地区土地利用类型以林地为主, 多年平均森林覆盖率为 40.81 %; 这些林地主要分布在大、小兴安岭和长白山地; 其次为耕地(水田 + 旱田), 多年平均比为 28.43 %, 耕地主要分布在中部平原区. 草地主要分布在呼伦贝尔草原和松嫩平原, 多年平均草地面积占总国土面积的 19.85 % (表 1).

从土地利用的动态变化看, 林地、草地、水域和未利用土地面积有下降趋势. 1986 ~ 2000 年间林地和草地均约下降 1.2 个百分点; 水域的下降比率最

大, 下降了 1.4 个百分点; 未利用土地下降了 0.42 个百分点. 水田、旱田和居工地的面积呈上升趋势; 其中旱田上升趋势最为明显, 1986 ~ 2000 年间上升了 2.22 个百分点.

表 1 东北区土地利用类型动态变化 / %

Table 1 The dynamic evolution of land-use in the northeast part of China / %

土地利用类型	1986 年	1996 年	2000 年	平均值
林地	41.31	40.93	40.18	40.81
草地	20.43	19.90	19.21	19.85
水田	3.00	3.03	3.60	3.21
旱田	23.98	25.47	26.20	25.22
水域	2.71	2.47	2.59	2.59
居工地	2.35	2.40	2.41	2.39
未利用土地	6.22	5.80	5.80	5.94

从土地利用变化空间格局看, 1986、1996 和 2000 年地块数量分别为 382 131 块、385 195 块和 373 934 块, 相应地单个地块平均面积出现了先降低后增加的趋势. 尽管 1986 ~ 2000 年间地块面积最大的土地类型均为有林地, 但其面积呈持续下降趋势, 1986 年、1996 年和 2000 年面积分别为 8 020.58 km^2 、7 977.20 km^2 和 7 970.48 km^2 .

3.2 水资源可再生能力及分异

3.2.1 水资源量可再生能力的年际变化

东北区多年平均总水资源量和地表水资源量的产水系数分别为 0.31 和 0.26,整体上呈下降趋势;且地表水资源的变化强度要大于水资源总量的变化, C_v 分别为 0.12 和 0.11.1980~2001 年间,东北区总水资源和地表水资源可再生能力的 r_s 均为 -0.195,呈现出下降趋势,但下降趋势不显著.从分区的水资源可再生能力看,辽河区地表水资源和总

水资源的可再生能力的下降趋势均小于黑龙江区,辽河区 r_s 分别 -0.056 和 -0.048,黑龙江区均为 -0.238;但辽河区水资源可再生能力的年际间变化程度要大于黑龙江区,辽河区地表水和总水资源量年际间的 C_v 分别为 0.17 和 0.16;而黑龙江区水地表水资源和水资源总量的可再生能力分别为 0.12 和 0.11(图 2).

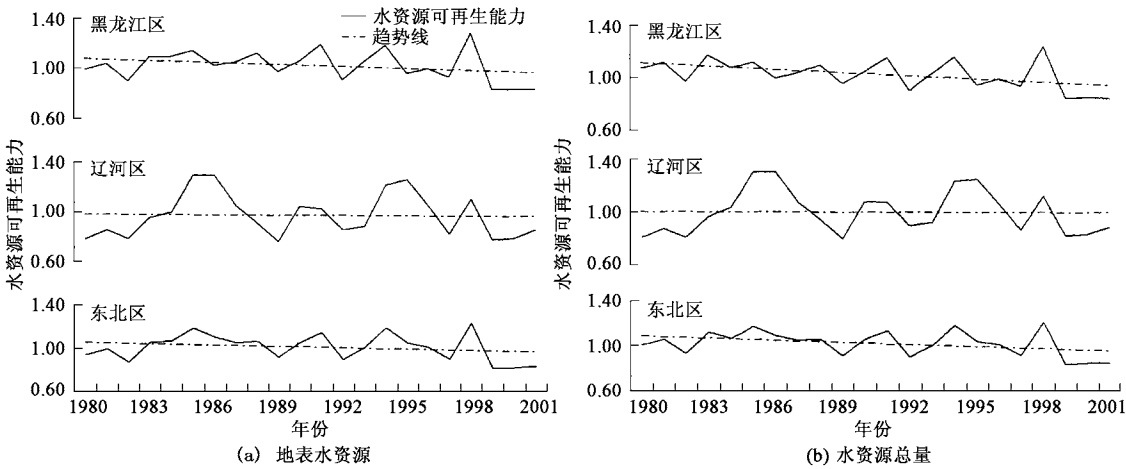


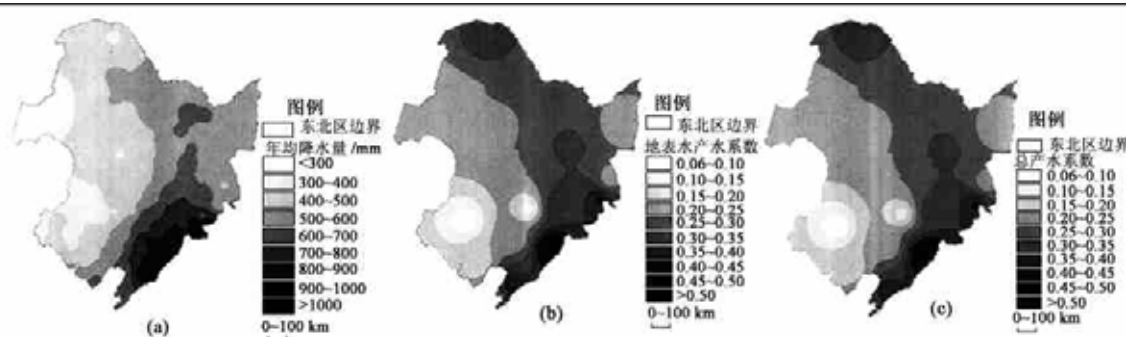
图 2 东北区水资源可再生能力年际变化(1980~2001 年)

Fig. 2 The temporal change of reproducible ability of water resource in the northeast part of China

3.2.2 水资源量可再生能力的空间变化

降水是水资源可再生能力得以实现的源动力,东北地区降水具有显著的空间分异特征,最大降水区为鸭绿江区,1956~2001 年间多年平均降水量为 882.93 mm,最小为额尔古纳河,降水仅为同期鸭绿

江区的 42.98%.从产水系数的地域分异看,鸭绿江区将降水转化为水资源的能力最强,多年平均产水系数为 0.49;西辽河和东辽河流域将降水转化为水资源的能力最弱,多年平均产水系数分别为 0.15 和 0.16,仅为鸭绿江区的 30.6%(图 3).



a 为 1956~2001 年间平均降水量的空间变化,b 和 c 分别为 1956~2001 年间平均地表水产水系数和总产水系数的空间分异

图 3 东北区降水及产水系数的空间分异

Fig. 3 The spatial variation of rainfall and water yielding coefficient in the Northeast part of China

降水和产水系数的动态变化制约着流域水资源可再生能力的动态变化.1980~2001 年间,黑龙江

区和辽河区的各二级区的水资源可再生能力均呈现下降趋势,但在 $\alpha = 0.01$ 水平上均不显著.从各小

区的下降程度来看,松花江干流区和东辽河的下
降程度最大,其 r_s 均小于 - 0.45;图们江、辽河
中下游区以及额尔古纳河区的水资源可再生能
力的下降程度较小,其 r_s 均大于 - 0.20.从年
际间变化程度看,

嫩江、东辽河、辽宁沿海诸河以及辽河中下
游地区的变化程度最大,其 C_v 值均在 0.20 以
上;黑龙江干流区水资源可再生能力年际间的
变化程度较小,其 C_v 值小于 0.15(表 2).

表 2 东北区水资源天然可再生能力及变化趋势评价(1980~2001 年)

参数	额尔古纳河		嫩江		第二松花江		松花江干流区		黑龙江干流		乌苏里江	
	总水资	地表水	总水资	地表水	总水资	地表水	总水资	地表水	总水资	地表水	总水资	地表水
	源量	资源量	源量	资源量	源量	资源量	源量	资源量	源量	资源量	源量	资源量
r_s	- 0.19	- 0.18	- 0.34	- 0.35	- 0.25	- 0.27	- 0.49	- 0.46	- 0.30	- 0.28	- 0.21	- 0.19
C_v	0.17	0.17	0.26	0.22	0.17	0.16	0.19	0.16	0.10	0.10	0.16	0.14

年份	东辽河		西辽河		辽宁沿海诸河		辽河中下游		图们江		鸭绿江	
	总水资	地表水	总水资	地表水	总水资	地表水	总水资	地表水	总水资	地表水	总水资	地表水
	源量	资源量	源量	资源量	源量	资源量	源量	资源量	源量	资源量	源量	资源量
r_s	- 0.52	- 0.58	- 0.05	- 0.24	- 0.30	- 0.30	- 0.17	- 0.18	- 0.05	- 0.05	- 0.43	- 0.44
C_v	0.37	0.25	0.20	0.13	0.27	0.26	0.27	0.22	0.16	0.16	0.20	0.20

3.3 水资源量天然可再生能力土地利用变化的响应
作为下垫面变化重要表征的土地利用类型变化,会对地表产水能力产生深刻的影响,从而制约着水资源可再生能力的分异.土地利用程度能综合反应出人类活动干扰下的土地动态变化过程.1986~2000 年间,随着土地利用程度的增加,东北区水资源可再生能力呈现出下降趋势;且水资源可再生能力的变化强度随着土地利用程度的增加而增强(图 4a 和图 4b).整体上表明随着人类活动对地表作用强度的增加,东北区天然水资源量的可再生能力趋于脆弱.但在一定的范围内,尽管土地利用程度相对较高,水资源可再生能力仍然可维持在一个较高的

水平(图 4a 和图 4b 右侧分布的波峰).就土地利用类型变化对水资源可再生能力的影响看,随着林草
地面积的增加和耕地面积的减少,产水系数呈现出
增加的态势,且振幅逐渐减小,可使得水资源安全系
数得以进一步提高(图 4c 和图 4d).但要使水资源
的可再生能力维持在一个较高的水平,需各种土地
利用类型的分布面积维持在一个合理的范围内(图
4c 和图 4d 右侧分布的波谱).这表明,要使得在人
类活动剧烈干扰的环境背景下的水资源的可再生能
力仍能维持在一个较高的水平上,需在分布式生态
水文机理剖析的基础上,对中国东北区的土地利用
格局进行科学调整.

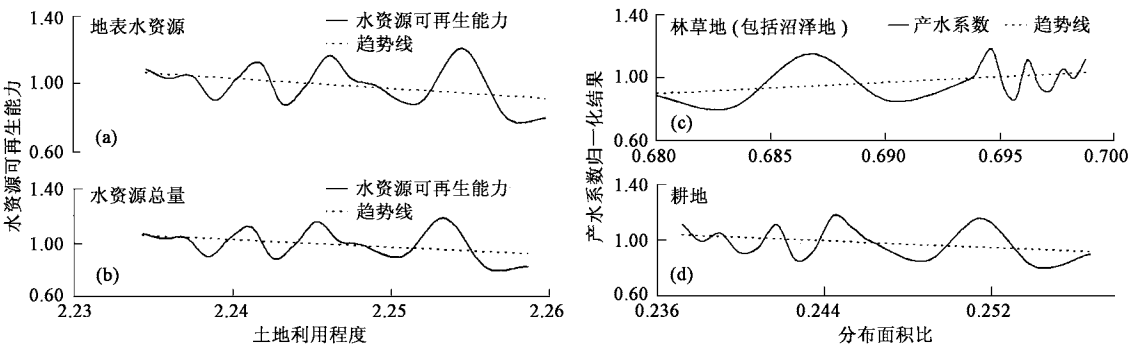


图 4 东北区天然水资源可再生能力变化对土地利用程度变化的响应

Fig. 4 The response of the natural reproducible ability change of water resource to the land use intension change in the northeast part of China

4 结论

(1) 东北区多年平均水资源总量为 1 991.52 亿

m^3 ,总量属于中等水平,人均占有量少,相当于全国
人均值的 78.1%,且具有显著的时空分异特征;水
资源变化具有 33a、11a 和 4a 周期.东北地区土地利

用类型以林地为主,多年平均森林覆盖率为40.81%,耕地面积占土地总面积的28.43%。

(2) 东北区多年平均总水资源量和地表水资源量的产水系数分别为0.31和0.26,水资源可再生能力整体上呈下降趋势,但不显著。相比之下,黑龙江区水资源可再生能力的下降趋势要大于辽河区,但年际间的变化程度较辽河区小。

(3) 东北区水资源可再生能力具有显著的空间分异特征,黑龙江区和辽河区各二级区的水资源可再生能力均呈现出下降趋势;其中以松花江干流区和东辽河流域的下降程度最为剧烈。水资源可再生能力的年际变化以嫩江流域的变化最为剧烈。

(4) 整体上看,随着土地利用程度的增加,水资源可再生能力在逐渐下降;随着林草地面积的增加,产水系数在逐渐增加。水资源可再生能力与土地利用程度的耦合变化进一步表明,需通过分布式的生态-水文机理的剖析,对土地利用格局进行科学调整,以使得在人类活动剧烈干扰下,水资源的可再生能力仍然维持在一个较高的水平上。

参考文献:

[1] 沈珍瑶.水资源可再生性初探[A].中国博士后2000(土木、水

利分册)[C].北京:科学出版社,2000.

[2] 牟海省.水资源内涵及价值评估若干模式的探讨[A].刘昌明,何希吾,任鸿遵.中国水问题研究[C].北京:气象出版社,1996.

[3] Newson M D. Land, water and development[M]. London: Routledge, 1992.

[4] Biswas A K, *et al.* Water for Sustainable Development in 21st Century[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.

[5] 夏军,谈戈.全球变化与水文科学新的进展与挑战[J].资源科学,2002,24(3):1~7.

[6] 夏军,朱一军.水资源安全度量[J].自然资源学报,2002,17(3):262~269.

[7] 曾维华,杨志峰,蒋勇.水资源可再生性刍议[J].水科学进展,2001,12(2):276~279.

[9] 沈珍瑶,杨志峰,刘昌明.水资源的天然可再生能力及其与更新速率之间的关系[J].地理科学,2002,22(2):162~165.

[10] Adam H S. A macroscale natural hydrologic cycle water availability model[J]. J of Hydrology., 1997,201:329~347.

[11] 夏军,王中根,刘昌明.黄河水资源量可再生性问题及量化研究[J].地理学报,2003,58(4):534~541.

[12] 刘昌明.二十一世纪中国水资源若干问题的讨论[J].水利水电技术,2002,33(1):15~19.

[13] 刘纪远.中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M].北京:中国科学技术出版,1996.

中国自然科学期刊综合引证指标(部分环境科学类期刊)

序号	刊名	类目号	载文量	总被引频次	影响因子	即年指标	被引半衰期
C0673	环境保护	ZK1 .1 .9	204	1037	0 .9440	0 .2206	3 .6
C0674	环境保护科学	ZK1 .1 .9	115	217	0 .2445	0 .0087	4 .2
C0675	环境导报	ZK1 .1 .8	431	210	0 .2281	0 .0070	3 .8
C0676	环境工程	ZK1 .1 .8	167	697	0 .5776	0 .0539	4 .7
C0677	环境化学	ZK1 .1 .9	117	1018	0 .8017	0 .0598	6 .3
C0678	环境技术	ZK1 .1 .8	82	57	0 .1709	0 .0122	3 .4
C0679	环境监测管理与技术	ZK1 .1 .8	132	145	0 .1830	0 .0227	4 .1
C0680	环境科学	ZK1 .1 .8	183	2210	1 .3051	0 .2295	5 .7
C0681	环境科学动态	ZK1 .1 .8	76	148	0 .5248	0 .0395	3 .5
C0682	环境科学学报	ZK1 .1 .8	161	1553	1 .1692	0 .1118	4 .6
C0683	环境科学研究	ZK1 .1 .8	102	856	0 .8910	0 .1373	4 .5
C0684	环境科学与技术	ZK1 .1 .8	151	420	0 .6985	0 .0464	3 .9
C0685	环境卫生工程	ZK1 .1 .9	67	115	0 .2283	0 .0299	4 .1
C0686	环境污染与防治	ZK1 .1 .9	131	727	0 .5850	0 .0534	5 .2
C0687	环境污染治理技术与设备	ZK1 .1 .9	276	1087	0 .7713	0 .0471	4 .6
C1754	中国环境科学	ZK1 .1 .8	146	1578	0 .9436	0 .0685	5 .3

1)清华大学中国学术期刊(光盘版)电子杂志社,中国科学文献计量评价研究中心,中国学术期刊综合引证报告(2004版).2004-11