

基于小波分析的伊塞克湖水位变化特征

米热古力·艾尼瓦尔¹, 海米提·依米提^{2,3},
麦麦提吐尔逊·艾则孜^{2,3}, 夏库热·塔依尔³, Yorov·Hasan³

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室,
新疆师范大学, 乌鲁木齐 830054; 3. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘 要:根据伊塞克湖 1950—2010 年期间的年平均水位资料,采用趋势分析和小波分析,对伊塞克湖年平均水位变化时间序列进行研究,从而揭示伊塞克湖水位变化的总体趋势和周期性变化规律。结果表明:(1) 1950—2010 年期间,伊塞克湖水位总体呈下降趋势,共下降 1.27 m,1950—1997 年水位持续下降,1998 年开始转为上升。(2) 20 世纪 90 年代之前,人类活动是引起湖泊水位下降的主要驱动因子;20 世纪 90 年代后,在全球气候变化的作用下,该地区降水量的增加影响到径流量的增加,从而引起湖泊水位的缓慢上升。(3) 1950—2010 年间的周期性分析结果显示,伊塞克湖年平均水位存在 21 a 的主周期,并且 2010 年以后的一段时间伊塞克湖水位处于偏高时期。

关键词:水位变化;小波分析;伊塞克湖

中图分类号:P343.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)01-0168-05

Water Level Variations of Issyk-Kul Lake Based on Wavelet Analysis

Mihrigul·Anwar¹, Hamid·Yimit^{2,3}, Mamattursun·Eziz^{2,3}, Shakure·Tahir³, Yorov·Hasan³

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046,

China; 2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources, Urumqi 830054, China;

3. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract:Based on the average annual water level data of Issyk-Kul Lake from 1950 to 2010, using trend analysis and Morlet Wavelet analysis to study the Issyk-Kul Lake average annual water level, which reveals the overall trend and periodic variation regularity of water level of Issyk-Kul Lake. The results show as follows: (1) Water level presented overall downward trend, decline in total 1.27 m in the period from 1950 to 2010, water level continued to decline from 1950 to 1997, water level began to rise in 1998. (2) Before the 1990s, human activities are the main driving factor causing the lake level decline, the increased precipitation of the region increased runoff due to the role of global climate change, causing the water level to rise slowly. (3) Results from the Periodic analysis of 1950—2010 showed that Issyk-Kul Lake water level change primary period was 21-year, and the period of time Issyk-Kul Lake water level remain rising after 2010.

Key words:water level variation; wavelet analysis; Issyk-Kul Lake

随着社会经济的发展,水资源缺乏的干旱区水资源可持续利用,成为人们关注的重点^[1]。干旱区内陆湖泊作为干旱区一种独特的生态系统单元,是维系干旱区人类生存和发展的基本场所之一^[2]。对于内陆干旱地区,湖泊所占据的面积虽小,发挥的作用却很

大,它不仅是维持生命活动的蓄水池,而且是物质循环和能量流动系统的重要场所。由于盲目开发利用内陆湖泊资源,在全球环境恶化、资源趋于枯竭、人口膨胀的今天,干旱区绿洲经济的发展与湖泊生态环境之间的关系愈不协调,已严重影响到干旱区湖泊的可

收稿日期:2013-10-20

修回日期:2013-12-02

资助项目:国家国际科技合作项目(2010DFA92720-28);国家自然科学基金项目(U1138302,41201032)

作者简介:米热古力·艾尼瓦尔(1987—),女(维吾尔族),新疆库车人,硕士研究生,从事干旱区水资源与生态环境研究。E-mail:mihray87@163.com

通信作者:海米提·依米提(1960—),男(维吾尔族),新疆博乐人,教授,博士,博导,从事干旱区水资源与生态环境研究。E-mail:yimith@yahoo.com

持续开发利用^[3]。

近几十年来,在气候因素和人类活动双重作用的影响下,亚洲中部干旱区水资源的时空格局与分布发生了重大的改变,引起了一系列的生态危机。现今亚洲中部有些内陆河流域,由于社会经济发展、人工绿洲不断扩大、水资源利用率不断提高、河流下游水量减少、尾间湖泊萎缩、荒漠绿洲生态环境不断恶化已成为普遍现象。新疆境内罗布泊的消失,艾丁湖的干涸,艾比湖、艾里克湖的萎缩,中亚的咸海危机等不断发生,而中哈跨界河流尾间湖泊(巴尔喀什湖、阿拉群湖和斋桑湖等)基本还保持着较好的原生态景观,可以说是中亚内陆湖泊生态环境保护的最好范例^[4-6]。

有关研究表明^[7],近几十年来中亚干旱地区内陆湖泊发生的各种变化,会引起一系列的生态灾难,导致生态环境的严重破坏。湖泊演变主要体现在湖泊水位,湖泊面积,矿化度,盐度的变化。其中,水位过高或过低都会带来生态与环境的破坏,当水位过高时,湖水面积增大,引起周围土壤排水困难,形成盐碱化,超过控制水位还会造成洪水灾害;水位过低,则影响湖泊生态系统,影响渔业和向孔雀河的输水量。因此,掌握水位变化趋势,找出变化对流域水资源、土地资源、渔业资源、芦苇资源、旅游等合理开发利用的关系。因此,充分认识干旱区湖泊水位变化的特征及驱动性因素,有利于正确评估气候变化和人类活动对湖泊变化的影响^[8-9]。

由于伊塞克湖水位自身存在着较高的自相关关系致使水位与气象因子的关系并不显著,加之有关研究中并未充分考虑人为因素与入湖流量对湖泊水位的影响,因此使得在伊塞克湖水位变化及其影响因子方面的研究仍待深入。本文通过对伊塞克湖 1950—2010 年水位资料分析,探讨近 60 a 来伊塞克湖水位变化情况,并讨论水位变化的驱动机理,能为干旱区湖泊水资源的合理利用和生态环境的保护提供科学依据。

1 研究区概况

伊塞克湖位于吉尔吉斯斯坦,是该国湖泊面积、水量最大的湖泊,分别占全国的 91% 和 97%^[10]。吉尔吉斯斯坦是中亚水资源最丰富的国家之一,以农牧业为主,工业基础薄弱,而且农业生产对水资源的依赖性特别强^[11]。伊塞克湖位于吉尔吉斯斯坦东北部,是昆格—阿拉套和杰兹科伊—阿拉套山脉之间的盆地^[12],是世界有名的构造陷落湖,中心位置在 77.33°E,42.42°N,东西长 178 km,南北宽 60.1 km,面积 6 236 km²,湖水体积 17 350 亿 m³,湖岸线周长

约 669 km,平均深度 278.4 m,最大深度 702 m^[13]。湖区年降水量 200~600 mm,周围多年平均气温 6~7℃,7 月平均气温 18℃,1 月平均气温,南北岸为 -2℃,西岸 -4℃,东岸 -10℃,年水面蒸发量 850~900 mm。伊塞克湖流域内有大小河流 118 条,尚有冰川 834 条,面积 650.4 km²,占流域面积的 3%^[14]。

2 资料与方法

2.1 数据来源

本文所使用的资料为 1950—2010 年伊塞克湖水位、降水量、入湖径流量、气温与灌溉耗水量等资料,数据来自波克罗夫卡(海拔 1 740 m)气象站观测资料和相关参考文献^[4,12,15]。利用 Matlab 7.0 软件,采用 Morlet 小波分析对伊塞克湖水位变化时间序列进行多时间尺度分析。

2.2 小波分析法

时间序列是一个非平稳的、复杂的系统过程,它具有尺度特征和混沌特征,不同的时间尺度隐含着不同的变化规律和变化趋势^[15]。一般的时间序列分析方法包括滑动平均、滤波、Fourier 变换等研究基础都是单一时间尺度,在时域和频域上不具有局部化、多层次和多分辨率的性质,不能客观地反映多时空尺度结构特征^[16]。20 世纪 80 年代初,由法国油气工程师 J. Morlet 在研究地震波局部性质时提出的一种具有时—频多分辨功能的小波分析为更好地研究时间序列问题提供了可能,它能清晰地揭示出隐藏在时间序列中的多种变化周期,充分反映系统在不同时间尺度中的变化趋势,并能对系统未来发展趋势进行定性估计。

小波分析是一种信号的时间尺度分析方法,具有多分辨率的特点,能够准确找到时间序列的大小周期尺度,已经在地理学研究中取得了一定的成果^[17]。对于任意函数 $f(x) \in L^2(R)$,以小波母函数 $\varphi(x)$ 为基础的连续小波变化(CWT)为 $f(x)$ 和 $\varphi_a b(x)$ 的内积。

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(x) \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1)$$

式中: a ——尺度因子,反映了小波的周期长度; b ——平移因子,反映时间上的平移。CWT 变化的结果得到许多小波系数 $W_f(a, b)$,该系数表示该部分信号与小波的近似程度。故本文采用 Morlet 小波对湖泊水位变化序列进行小波分析。其表达式为:

$$\varphi(x) = e^{i\omega_0 x} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2)$$

式中: W_0 ——常数; i ——虚数。傅立叶变换为 $\varphi(x)$

$=\sqrt{2\pi e^{-\frac{(w-w_0)^2}{2}}}$, 当 $W_0 \geq 1$ 时, 近似满足条件。Morlet 小波的时间尺度 a 与周期 T 存在以下关系:

$$T=\frac{4\pi}{\omega_0+\sqrt{2+\omega_0^2}}a \tag{3}$$

当 $W_0=6.2$ 时, $T=a$, 故 Morlet 小波可以做气候系列的周期分析。通过小波变换, 将 $f(x)$ 一维水文序列转换为 a, b 为坐标的小波系数图。小波系数的垂直截面图表示序列中每一年的小波特征, 小波系数的水平截面图表示序列中每种周期的小波随时间的变化。小波系数图中, 等值线的闭合中心对应于径流变化中心, 正值表示径流量增多, 负值表示径流量减少, 小波系数的零点对应于径流量的突变点。Morlet 小波的连续小波变换为:

$$W_f(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{\mathbb{R}}f(x)e^{i\omega_0(\frac{x-b}{a})}e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-b}{a})^2}dx \tag{4}$$

3 伊塞克湖水位变化特征

3.1 伊塞克湖水位变化趋势分析

图 1 为 1950—2010 年间伊塞克湖水位变化趋势, 图中可以看出, 水位总体呈下降趋势。根据年平均水位变化特征, 水位变化过程可以分 4 个阶段: 分别为 1950—1960 年和 1999—2010 年间的上升阶段, 1961—1986 年和 1987—1998 年间的下降阶段。

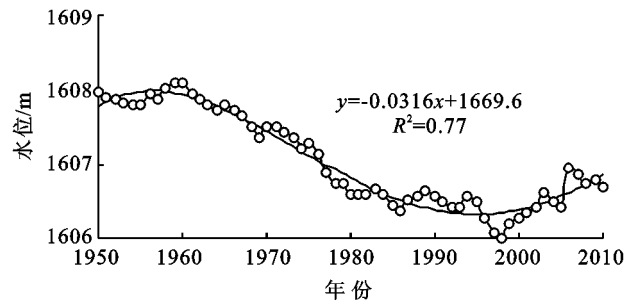


图 1 1950—2010 年伊塞克湖水位变化

表 1 伊塞克湖水位各阶段变化特征

时间	平均湖 水位/m	变化值/ m	变化速率/ (m·a ⁻¹)
1950—1960	1607.93	+0.13	0.01*
1961—1986	1607.19	-1.59	0.06
1987—1998	1606.41	-0.51	0.05
1999—2010	1606.56	+0.49	0.04

1950—1960 年为缓慢上升阶段, 上升速率为 0.012 m/a。20 世纪 50 年代以后, 伊塞克湖流域降水量和入湖径流量呈上升趋势(图 2), 导致湖水位上升。1961—1986 年相比其他阶段下降最明显, 下降速率为 0.06 m/a, 25 a 共下降了 1.59 m(表 1)。这段时间水位下降主要是人类活动所引起的, 1960 年

以后, 伊塞克湖流域灌溉面积明显增加, 20 世纪 80 年代中期灌溉面积已经达到 15.4 万 hm², 由于灌溉面积增大, 灌溉耗水量迅速上升, 从而河流引水量增加, 而且, 利用方式落后, 伊塞克湖地区 90% 的灌溉土地进行漫灌, 随着气温的上升, 这种灌溉方式导致大部分水通过蒸发损失。灌溉系统不配套和破损, 导致水资源利用效率不高, 水资源严重损失, 这都引起入湖水量的减少。1987—1998 年波动式下降, 1998 年到达最低水位 1 605.99 m, 下降速率为 0.05 m/a。这主要是因为在在这段时间内随着农业耗水量的增加, 生活和工业耗水量也明显增加, 除此之外, 从湖泊形态来说, 伊塞克湖边坡很陡, 湖水较深, 使湖泊水位上升速度较慢, 因此, 即使入湖降水和入湖径流量增多, 短时间内湖泊水位上升不是很明显。1998 年后, 水位开始上升, 一直上升到 2010 年, 共上升 0.49 m。从图 2 可以看出, 20 世纪 90 年代中后期, 伊塞克湖流域降水量没有明显变化趋势, 虽然蒸发量大幅度增加, 但入湖径流量也明显增多, 同时随着灌溉技术的提高, 使灌溉用水量逐年减少, 灌溉引水大幅减少^[18], 使得湖泊水位逐渐上升。有关研究^[19]也表示, 伊塞克湖水位还将会因为雨雪比例的增大及冰川融水的大量增加而上升。

3.2 伊塞克湖水位变化规律分析

用 Morlet 小波对伊塞克湖 1950—2010 年标准化水位资料进行连续小波变换, 可以得出水位序列变化系数的实部和模。首先绘制变换系数实部的时频等值线图, 小波系数的实部包含给定时间和尺度下, 相对于其他时间和尺度, 信号的强度和位相两方面的信息。图 3 为伊塞克湖水位变化序列 Morlet 小波变换实部的实频变化, 图中纵坐标小波尺度取 1~32 a, 横坐标为整个观测时段(即 1950—2010 年), 图中实线表示小波系数实部为正, 水位上升, 小波系数实部为负, 水位下降。从分析得知, 水位存在 28 a 以上, 20~23 a 和 18 a 以下 3 类尺度的周期变化规律。

从图 3 可以看出, 28 a 以上时间尺度低频振荡的中心尺度为 32 a, 存在两突变点, 分别在 1977 年、1998 年左右, 1950—1977 年和 1998—2010 年时间段为正位相, 表示水位比较高, 1978—1998 年水位偏低, 而且该周期处其等值线还未完全闭合, 从此可以预测, 在未来的一段时间内伊塞克湖水位会继续上升。整个伊塞克湖水位变化在 20~23 a 尺度范围内具有较强周期, 该处的中心尺度为 21 a, 存在 6 个突变点, 分别在 1960 年、1969 年、1976 年、1986 年、1994 年、2004 年。

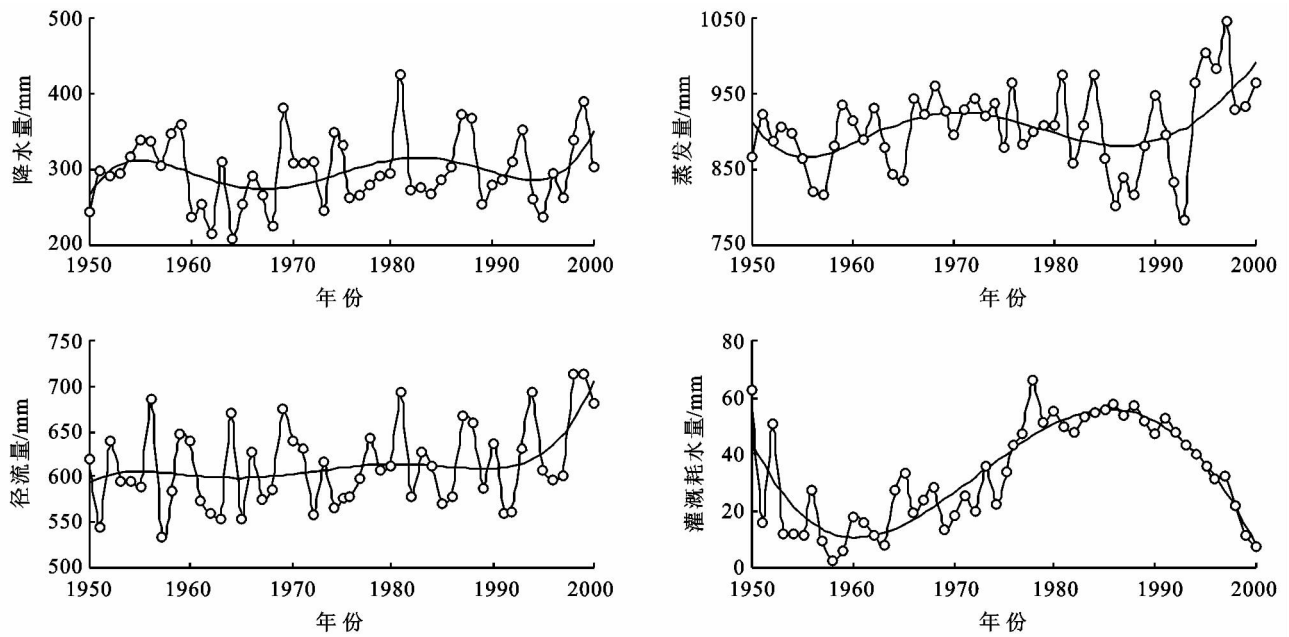


图 2 伊塞克湖水位变化各影响因素的变化

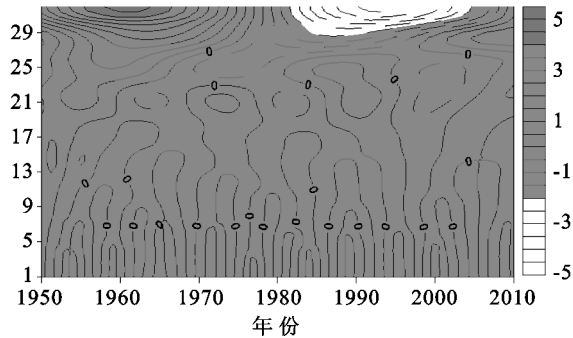
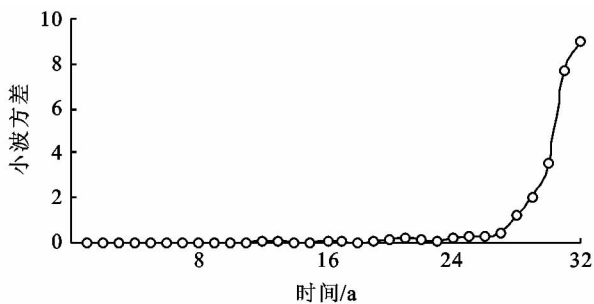


图 3 1950—2010 年伊塞克湖水位小波变换系数实部

将不同时间尺度下的小波系数代入小波方差定义式,可得水位变化的小波方差,以小波方差为纵坐标,时间尺度 a 为横坐标,可绘制小波方差图小波方



差图,能反映径流时间序列的波动能量随尺度的分布情况,可用来确定径流演化过程中存在的主周期。

根据伊塞克湖年平均水位变化等值线图和小波方差图(图 4)可知,年平均水位变化存在 21 a 的显著周期,这与张瑞波等学者研究分析得出的吉尔吉斯斯坦东部干湿变化周期为 21 a 的结果相一致^[20]。

21 a 周期处 1950—1960 年、1969—1977 年、1986—1994 年、2005—2010 年表现为正位相,年平均水位处于偏高,而在 1961—1968 年、1978—1986 年、1996—2004 年为负位相,年平均水位处于偏低,并且 2010 年以后的一段时间伊塞克湖年平均水位处于偏高时期。

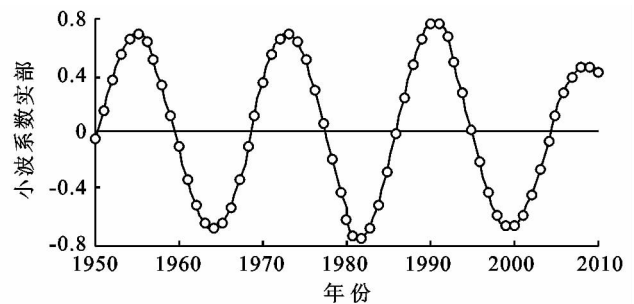


图 4 伊塞克湖水位变化小波分析

4 结论

(1) 伊赛克湖水位 1950—2010 年间总体上表现为下降趋势,60 a 共下降了 1.27 m。其中 1961—1986 年最为明显,1998 年下降到最低水位 1 605.99 m,之后转折上升,到 2010 年底已经上升了 0.69 m。从最近几年的变化情况来看,湖面处于自然恢复状

态,说明已无需从其他流域向伊塞克湖调水。

(2) 1950—2010 年,由于流域内农业灌溉引水和蓄水等活动及 20 世纪 80 年代末以后气候变化的影响下,伊塞克湖水位发生了下降转回升的波动性变化。因此结论伊塞克湖水位变化主要受人类活动和气候变化的双重影响。从分析可以得知,到 20 世纪 90 年代,湖泊水位下降主要受人类活动的影响,即伊

塞克湖流域农业灌溉始于19世纪,之后日益旺盛,由于利用方式落后,灌溉系统不配套和破损,而且大部分灌溉土地使用漫溉,随着气温上升,这种灌溉方式导致大部分水通过蒸发损失。20世纪90年代开始气候变化起主导作用,全球变暖的影响下,一方面温度升高,水循环加快,大气中水汽含量增加,降水也增多,从而入湖径流大幅度增加,另一方面,高山区气温升高,这有利于分布在海拔3 600~4 300 m的冰川消融,使入湖径流量明显增加。同时,耕地面积明显减少,农业技术水平和灌溉系统改善,灌溉用水量减少等有利于湖泊水位上升。

(3) 水位变化小波分析结果表明,水位存在28 a以上,20~23 a和18 a以下3类尺度的周期变化规律,其中20~23 a尺度下信号振荡最强烈,湖泊年平均水位存在21 a的主周期,并且2010年以后的一段时间伊塞克湖年平均水位处于偏高时期。

参考文献:

- [1] 李新虎,宋郁东,张奋东,等. 博斯腾湖最低生态水位计算[J]. 湖泊科学,2007,19(2):177-181.
- [2] 张宝林,贾瑞晨,张倩,等. 基于遥感的达来诺尔湖泊水域面积变化研究[J]. 水土保持研究,2011,18(6):196-199.
- [3] 陈红宝,王乃昂,朱金峰. 青海湖及毗邻地区气候变化灰色模型预测[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(5):124-128.
- [4] 王国亚,沈永平,王宁练,等. 气候变化和人类活动对伊塞克湖水位变化的影响及其演化趋势[J]. 冰川冻土,2010,32(6):1097-1105.
- [5] 邓铭江,王志杰,王姣妍,等. 巴尔喀什湖生态水位演变分析及调控对策[J]. 水力学报,2011,42(4):403-413.
- [6] 龙爱华,邓铭江,谢蕾,等. 巴尔喀什湖水量平衡研究[J]. 冰川冻土,2011,33(6):1341-1352.
- [7] 中国末次冰盛期以来湖泊水量变化及古气候变化机制解释[J]. 湖泊科学,2005,17(1):35-40.

(上接第167页)

- [4] 王卉彤,石刚. 促进主体功能区规划实施的财政与金融政策研究[J]. 财政与金融,2008(12):40-42.
- [5] 徐勇,刘艳华,汤青. 国家主体功能区划与黄土高原生态恢复[J]. 水土保持研究,2009,16(6):1-5.
- [6] 刘富朝. 金沙江上游山地限制开发区的未来协调方向[J]. 经济研究·消费导刊,2009(10):95-96.
- [7] 普荣,白海霞. 金沙江中上游山地限制开发区经济发展路径选择[J]. 河北科技大学学报:社会科学版,2010,10(3):17-21.
- [8] 陶静,马海霞. 新疆限制开发区产业问题研究[J]. 实事求是,2010(3):53-58.
- [9] 李富佳,韩增林,王利. 主体功能区划下过渡期辽宁限制

- [8] 万洪秀,孙占东,王润. 博斯腾湖水位变动对湿地生态环境的影响[J]. 自然资源学报,2006,21(2):260-266.
- [9] 张宝成,曹军骥,白艳,等. 气候变化对青海湖天然高寒草原草场优势牧草群营养成分的影响[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(3):127-130.
- [10] 李均力,陈曦,包安明. 2003—2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征[J]. 地理学报,2011,66(9):1219-1229.
- [11] Pahl-Wostl C. The implications of complexity for integrated resources management[J]. Environmental Modelling & Software,2007,22(5):561-569.
- [12] 吴森,张小云,王丽贤,等. 吉尔吉斯斯坦水资源及其利用研究[J]. 干旱区研究,2011,28(3):455-462.
- [13] 王国亚,沈永平,秦大河,等. 1860—2005年伊塞克湖水位波动与区域气候水文变化的关系[J]. 冰川冻土,2006,28(6):864-870.
- [14] Jean Klerkx. Beishen Imanackunov Lake Issyk-kul: Its Natural Environment[M]. Kluwer Academic Publishers,2002.
- [15] 秦伯强. 中亚近期气候变化的湖泊响应[J]. 湖泊科学,1993,5(2):118-127.
- [16] 王秀杰,费守明. 小波分析方法在水文径流模拟中的应用[J]. 水电能源科学,2007,25(7):1-4.
- [16] 董长虹. Matlab小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [17] 刘晓安. 小波分析在径流分析和预报中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [18] Grosswald M G, Kuhle M, Fastook J L. Würm glaciation of Lake Issyk-Kul area, Tian Shan Mts.: A case study in glacial history of Central Asia[J]. GeoJournal, 1994,33(2/3):273-310.
- [19] 李湘权,邓铭江,龙爱华,等. 吉尔吉斯斯坦水资源及其开发利用[J]. 地球科学进展,2010,25(12):1368-1375.
- [20] 张瑞波,袁玉江,魏文寿,等. 树轮记录的吉尔吉斯斯坦东部过去百年干湿变化[J]. 干旱区地理,2013,36(4):691-699.

- 开发区发展模式[J]. 地理科学进展,2008,27(5):103-111.
- [10] 王玉岩. 湖北省农业型限制开发区发展战略研究[D]. 武汉:华中师范大学,2009:24-26.
- [11] 张焱,陈清,何丽娟. 基于ENVi4.2的遥感图像分析处理:以广州市北部地区的ETM遥感图像为例[J]. 软件导刊,2008,7(6):110-111.
- [12] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J]. 生态学报,2007,27(4):1257-1264.
- [13] 李月辉,肖笃宁,高琼,等. 沈阳市市域景观功能区划及发展策略[J]. 应用生态学报,2007,18(12):2821-2826.