

DOI: 10.5846/stxb202001030023

崔颖, 张学霞, 张雪, 方宇, 郭长庆. 若尔盖县湿地稳态转换的水文地貌生态阈值. 生态学报, 2020, 40(23): 8794-8804.

Cui Y, Zhang X X, Zhang X, Fang Y, Guo C Q. Hydrological and geomorphologic ecological threshold of steady-state transformation of wetland in Zoige County, Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8794-8804.

若尔盖县湿地稳态转换的水文地貌生态阈值

崔 颖¹, 张学霞^{1,2,*}, 张 雪¹, 方 宇¹, 郭长庆¹

¹ 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

² 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083

摘要:以若尔盖县湿地为研究对象,在 Google Earth 影像和野外调查基础上获取若尔盖县人工沟渠的空间分布数据,并计算结构特征指数。从地形地貌和水文条件两个方面选择 6 项指标,利用熵值法筛选出对湿地稳态转换影响最大的指标并厘定生态阈值,包括理想值和临界值,通过 1980—2015 年土地利用数据识别若尔盖县湿地稳态转换区,最终基于乡镇尺度确定生态阈值调控范围,划分各乡镇湿地恢复优先性。结果表明:(1)若尔盖县存在四类湿地稳态转换区,其中稳态平衡区面积最大,占全县湿地面积的 47.56%,退化转化区次之,占全县湿地面积的 35.88%。(2)对若尔盖县湿地稳态转换影响最大的两项水文地貌生态指标为网络联通度和沟渠密度,权重分别为 0.162 和 0.161。若尔盖县网络联通度的理想值为 0.033、临界值为 0.054;沟渠密度的理想值为 0.011 km/km²、临界值为 0.360 km/km²。(3)在若尔盖县需要进行湿地恢复的 10 个乡镇中,按湿地恢复优先性划分出 3 个三级恢复区、4 个二级恢复区、3 个一级恢复区,其中一级恢复区应优先恢复。

关键词:生态阈值;调控;湿地恢复;若尔盖县

Hydrological and geomorphologic ecological threshold of steady-state transformation of wetland in Zoige County, Sichuan Province

CUI Yi¹, ZHANG Xuexia^{1,2,*}, ZHANG Xue¹, FANG Yu¹, GUO Changqing¹

¹ School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Key Laboratory of Soil and Water Conservation State Forestry Administration, Beijing 100083, China

Abstract: The subject of the research described in this article are the Zoige County wetlands. The spatial distribution of man-made ditches in Zoige County was obtained from Google Earth images and field surveys, and the structural feature index calculated. Six indicators were selected from two aspects of terrain and hydrological conditions. The entropy method was used to screen for the indicators that had the greatest impact on wetland steady-state transition and that determined the ecological threshold. Having identifies wetland steady-state transition zones in Zoige County from 1980—2015 land use data, an ecological threshold control range was finally determined based on township size, and the priority of wetland restoration in each township was allocated. The results show the following: (1) There are four types of wetland steady-state transition zones in Zoige County, of which the stable zone is the largest, accounting for 47.56% of the county's wetland area. The degradation zone accounts for 35.88% of the county's wetland area. (2) The two hydrological and geomorphological ecological indicators that have the greatest impact on steady-state conversion of wetland in Zoige County are network connectivity and ditch density, with weights of 0.162 and 0.161, respectively. Ecological thresholds of network connectivity in Zoige County are 0.033 and 0.054, and those of ditch density are 0.011 and 0.360 km/km². (3) In the 10 townships in Zoige County where wetland restoration is needed, three tertiary restoration areas, four secondary restoration

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0504802)

收稿日期:2020-01-03; 修订日期:2020-05-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuexiazh@yeah.net

areas, and three primary restoration areas are defined according to the priority of wetland restoration. The primary recovery areas should be restored first.

Key Words: ecological threshold; control; wetland restoration; Zoige County

湿地是分布于陆生生态系统和水生生态系统之间具有独特水文、土壤、植被与生物特征的生态系统,是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一,在气候调节、促淤造陆、蓄洪防旱、降解环境污染等方面起着极其重要的作用,享有“地球之肾”的美誉^[1]。生态阈值是指生态系统质量、性质或现象发生突变,或环境驱动力的微小变化对生态系统产生巨大响应的点^[2]。遥感技术可以快速、准确的探究湿地生态系统时空变化规律,从而分析湿地生态系统稳态转换的生态阈值。阈值的获取对于湿地保护、恢复、预警等方面具有极其重要的现实意义。

对于湿地生态系统而言,地形起伏直接影响着湿地的生态过程和功能发挥^[3]。湿地土壤、湿地生物、小气候、水文等要素的空间分异规律在一定程度上受到湿地地形地貌的影响^[4]。水是湿地生态系统的控制性环境因子,水文过程控制着湿地的形成与演化,是塑造湿地生态系统结构与功能、引起湿地景观动态变化的重要驱动力^[5]。人工沟渠对湿地的水文过程有着直接影响^[6-7],通过管理规划沟渠,可以排水疏干沼泽,也可以恢复或提高湿地的水位。

若尔盖湿地是典型泥炭沼泽湿地,是重要的生态敏感区、生物多样性丰富带,在调节区域乃至全球气候等方面有十分重要的作用。作为黄河上游的重要水源涵养地,若尔盖湿地储存了约 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 地下水,每年向黄河源干流补水约 $40 \times 10^8 - 50 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5]。20 世纪 60 年代以来,若尔盖地区开展了大规模的开沟排水活动,据统计,1965—1973 年期间,若尔盖县挖沟长度总计 200 km,受影响的沼泽面积达 1400 km²,约 800 km² 的沼泽变为半湿或干化状态^[8]。研究表明,如果生态系统经历了稳态转变,则可以通过将影响因素水平降低到比变化前更低的水平来实现生态系统的恢复^[9]。对于处于退化状态的生态系统,如果可以预先确定稳态转变的阈值和可能发生机制,则可以提前控制以降低恢复成本。胡春明等^[10]以二卡自然保护区为研究区域,通过分析月均流量频率分布特征划分低、中、高径流期作为稳态转换的依据,将此时的湿地状态作为生态阈值。吴东浩等^[11]基于大型底栖无脊椎动物密度变化,利用统计分析方法寻找突变点,以此确定西苕溪上游流域河流营养盐浓度阈值。

针对若尔盖县人工排水导致湿地萎缩和退化的现状,亟需获取湿地稳态转换的水文地貌生态阈值,制定切实可行的湿地保护和修复调控策略。因此,本文以若尔盖县湿地为研究对象,结合遥感和生态学方法,基于行政乡镇尺度,得到湿地稳态转换的生态阈值,并从空间层面划定湿地恢复的优先性。研究结果可以为湿地保护及湿地修复的调控管理提供理论支撑和决策参考。

1 研究区概况

若尔盖县位于青藏高原东北部边缘,隶属四川省阿坝藏族羌族自治州,地理位置为 $32^{\circ}56' - 34^{\circ}19' \text{N}$, $102^{\circ}08' - 103^{\circ}39' \text{E}$,总面积 10436.58 km²,平均海拔 3471 m。若尔盖县气候湿润寒冷,年平均气温 0.6—1.2℃,年降水量 560—860 mm,但近年来出现了明显的暖干化趋势^[12]。若尔盖县分布着黑河、白河等河流以及花湖、哈丘湖、兴措湖等湖泊,河流、沼泽等湿地广布。地貌类型以河谷阶地、低山丘陵和高山峡谷为主。若尔盖县广泛发育高原草甸土和泥炭沼泽土,植被以亚高山草甸和沼泽植被为主。研究区建有若尔盖湿地国家级自然保护区和花湖湿地示范工程。

在全球变暖、区域蒸发量增大等气候变化和过度放牧、开挖沟渠等人类活动的影响下,研究区湿地生态环境明显恶化。2015 年若尔盖县开挖沟渠共计 219 条,总长度超过 4500 m。人工沟渠直接改变了若尔盖县的水系分布及其水文连通性,排走了大量的地表水,沼泽疏干后土壤逐渐裸露变干,引起湿地萎缩^[13]。

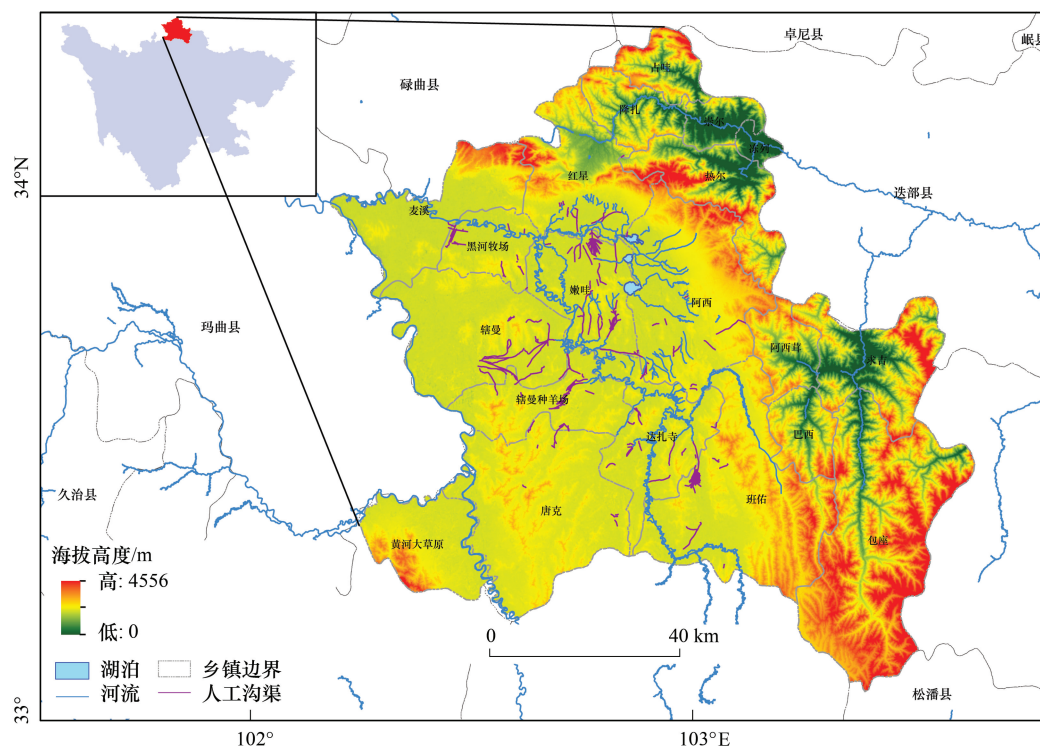


图1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Location map of the study area

2 数据和研究方法

2.1 数据来源

研究所使用的土地利用数据来源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>) 的全国陆地区域多时相土地利用现状数据集,共有 1980、1990、1995、2000、2005、2010 年和 2015 年 7 期,空间分辨率为 1 km。该数据集以 Landsat TM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生成,经过野外调查实地验证,土地利用现状一级类型综合评价精度达到 93% 以上^[14]。其分类体系中共有 6 个一级类型和 26 个二级类型。依据《湿地公约》中对湿地的定义,将二级类型中的河渠、湖泊、滩地及沼泽地作为研究的湿地,其余土地利用类型被划分为非湿地。所使用的沟渠矢量数据是在野外调研的基础上,结合 Google Earth 遥感影像,通过目视解译获得。DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>) 的 GDEM V2 数字高程数据,空间分辨率为 30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 水文地貌指标的选取

水文地貌条件是影响湿地形成和发育的基础,地势平坦且河流分布广泛的地区往往更容易孕育大面积沼泽湿地,开沟排水是若尔盖县疏干沼泽的重要方式,故本文选择海拔高度、险峻程度、地形湿度指数 (Topographic Wetness Index, TWI)、沟渠密度、线点率以及网络连通度 (Network connectivity) 作为重要的水文地貌指标。

险峻程度是指某一确定面积内最高和最低点之高差^[15]。利用 ArcMap 中的空间分析模块,用邻域分析-焦点统计工具,划分 3×3 像元的矩形,求取分析窗口内的高差,作为目标栅格的险峻程度。

TWI 是利用 DEM 数据生成坡度和汇流面积并进行栅格计算得到的指数^[16]。公式如下:

$$TWI = \ln(\alpha / \tan \beta) \quad (1)$$

式中, α 为流经地表某点的单位等高线长度上的汇水面积, β 代表该点处的地形坡度, $\tan\beta$ 为局部坡角。为避免 $\tan\beta$ 出现等于 0 的情况,研究中用 10^{-10} 代替等于 0 的坡度。规定单位汇水面积取值最小为 1 个栅格单元长度,以避免比值为 0 的情况出现。由此方法计算出若尔盖县的 TWI。

沟渠密度用单位面积上的沟渠总长度来表示^[17-19],公式如下:

$$D=L/A \quad (2)$$

线点率是指网络中每个节点的平均连线数^[14-15],公式如下:

$$\beta=L/V \quad (3)$$

网络连通度是用来描述网络中所有节点被连接的程度,即一个网络中连接沟渠数与最大可能连接沟渠数之比^[17-18],公式如下:

$$\gamma=L/3(V-2) \quad (4)$$

式中, D 为沟渠密度, L 为连接沟渠数, A 为湿地面积, β 为线点率, V 为节点数, γ 为网络连通度。由于沟渠矢量数据存在冗余点,经反复尝试验证,最终阈值为 10 m 时去除冗余点、保留有效节点效果最好。线点率的数值范围为 0—3。线点率为 0 时表示无网络存在;线点率增大,表示网络内每一节点的平均沟渠连数增加,网络复杂性增强。网络连通度的变化范围为 0—1。网络连通度为 0 时,表示没有节点相连;网络连通度为 1 时,表示每个节点都彼此相连。

2.2.2 熵值法

熵主要反映系统的混乱程度,在信息论中,熵是对不确定性的一种度量,而信息是有序程度的度量,二者绝对值相等,符号相反^[20]。在由 n 个评价方案和 m 个评价指标所构成的指标数据矩阵 $X=\{x_{ij}\}_{n \times m}$ 中,数据的离散程度越大,信息熵越小,所提供的信息量越大,该指标对综合评价的影响越大,其权重也越大;反之,各指标之间差异越小,信息熵就越大,所提供的信息量则越小,权重亦越小。

2.2.3 生态阈值统计分析法

生态阈值概念是 20 世纪 70 年代提出的,主要指生态系统的几个稳态之间突然改变的点或区域^[21]。生态系统对干扰的反应会随着干扰力度的改变而出现突然的变化,致使系统结构或功能发生相应的改变,即稳态转换^[9]。如图 2 所示,显示出生态系统稳态的变化过程,不同的稳态(左、右)之间有一个临界点,半圆的深度代表生态系统对干扰的“抵抗力稳定性”,半圆最高点到底部的倾斜表示生态系统的“恢复力稳定性”,在某一时刻,干扰会将一个系统推到一个临界点以外,进入另一个状态^[22]。研究表明,在生态恢复和退化过程中都有不同的响应阈值。这往往取决于所采用的时间和空间尺度,以及驱动因素的动态特征和生态系统的状况。)表明生态系统的退化阈值,超过这个阈值,生态系统无法恢复到未受破坏的状态。显示了生态恢复的人为干预的合理阈值,超过该阈值,生态系统功能不会显着增加,并且可能会下降(图 2)。

确定生态阈值的方法主要分为三种:实验监测、机理性数值模型模拟和统计分析方法。实验监测的方法主要应用于大气、海洋及河口的研究,对生态系统物种结构和功能的监测更为侧重,但该判定方法主要适用于特定生物种群或特定检测目标,缺乏对生态系统整体变化的判定,监测成本较高。机理性数值模型模拟在预测和预警方面比较突出,能够较全面的解释生态系统稳态转换的过程和机理,但多数模型无法模拟稳态变化的非线性特征,需要长期数据来进行验证。本文采用统计分析方法揭示若尔盖县湿地稳态变化的生态阈值,该方法基于长时间序列监测数据的规律来揭示稳态转换现象,以此来寻找生态阈值,是最为常用的方法。该方法并不需要掌握生态系统的复杂动态机制和过程,简便而有效^[9]。

本文以 1980、1990、1995、2000、2005、2010 年和 2015 年 7 期土地利用数据为数据源,将土地利用类型的变化看作时间序列上湿地生态系统稳态类型的突变,并划定稳态转换区,利用 ArcGIS 叠加分析功能,将稳态转换区对应的水文地貌指标数值作为所寻求的生态阈值。

3 结果与分析

3.1 水文地貌指标权重分析

为了探究影响湿地稳态转换的水文地貌指标,本文以行政乡镇作为最小计算单元,以湿地面积和湿地面

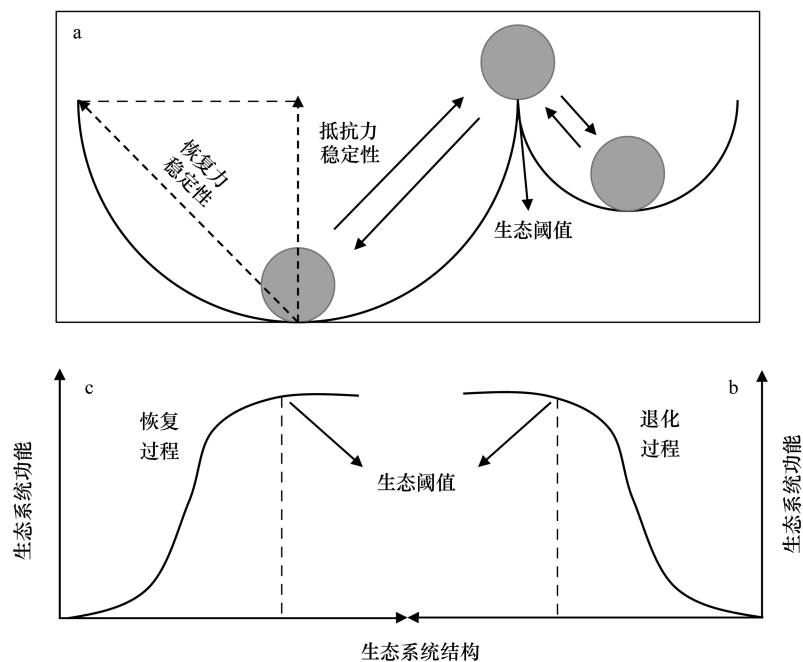


图 2 生态系统稳态转换原理及生态阈值理论示意图^[22]

Fig.2 Schematic diagram of ecosystem steady-state conversion principle and ecological threshold theory

积比例表示湿地稳态变化,选择沟渠密度、线点率、网络连通度、海拔高度、险峻程度和 TWI 作为可能影响湿地稳态转换的水文地貌指标,利用熵值法计算各指标权重。在若尔盖县所有乡镇中,热尔乡没有湿地分布,阿西茸乡、巴西乡、崇尔乡、冻列乡、降扎乡、求吉乡和占哇乡没有人工沟渠分布,因此不列入计算单元。由于正向指标和负向指标数值代表的含义不同(正向指标数值越高越好,负向指标数值越低越好),将各乡镇湿地面积、湿地面积比例和 TWI 作为正向指标,将海拔高度和险峻程度作为负向指标。基于卢涛等^[17]和刘路明等^[23]的研究,沟渠网络结构复杂程度与沼泽所占面积成反比,与草甸群落植物多样性成正比,因此,在湿地变化类型的各项指标中,将沟渠密度、线点率和网络连通度作为负向指标。权重越大,生态指标对湿地稳态的影响越大。由表 1 可知,对湿地稳态影响最大的两项指标为网络连通度和沟渠密度,权重分别是 0.162 和 0.161。说明沟渠的数量和结构是对若尔盖县湿地稳态变化影响最大的因素,以开沟排水为主的干扰活动对若尔盖县湿地的稳态转化影响很大。

表 1 若尔盖县水文地貌指标的权重

Table 1 Weights of hydrological and geomorphological indicators in Zoige County							
湿地面积 Wetland area	湿地面积比例 Wetland area ratio	沟渠密度 Ditch density	线点率 Ratio of line to node	网络连通度 Network connectivity	海拔高度 Altitude	险峻程度 Degree of relief	地形湿度指数 Topographic wetness index
0.097	0.106	0.161	0.152	0.162	0.109	0.118	0.096

3.2 生态阈值计算

3.2.1 湿地稳态转换区划分

若尔盖县湿地稳态与非湿地稳态的转换规律是计算生态阈值的依据,高跃鹏等^[24]基于 1980—2015 年全国陆地区域多时相土地利用现状数据集将若尔盖湿地变化类型分为稳定型、退化型、恢复型和波动型。本文采用其对若尔盖县湿地变化类型的划分方法,根据若尔盖湿地稳态转化方向的不同,将湿地稳态转换区分为恢复转化区、退化转化区、稳态平衡区和波动变化区。经统计,若尔盖湿地稳态平衡区面积最大,共计 1384 km²,占全县湿地面积的 47.56%;退化转化区次之,面积为 1044 km²,占全县湿地面积 35.88%;恢复转化区面

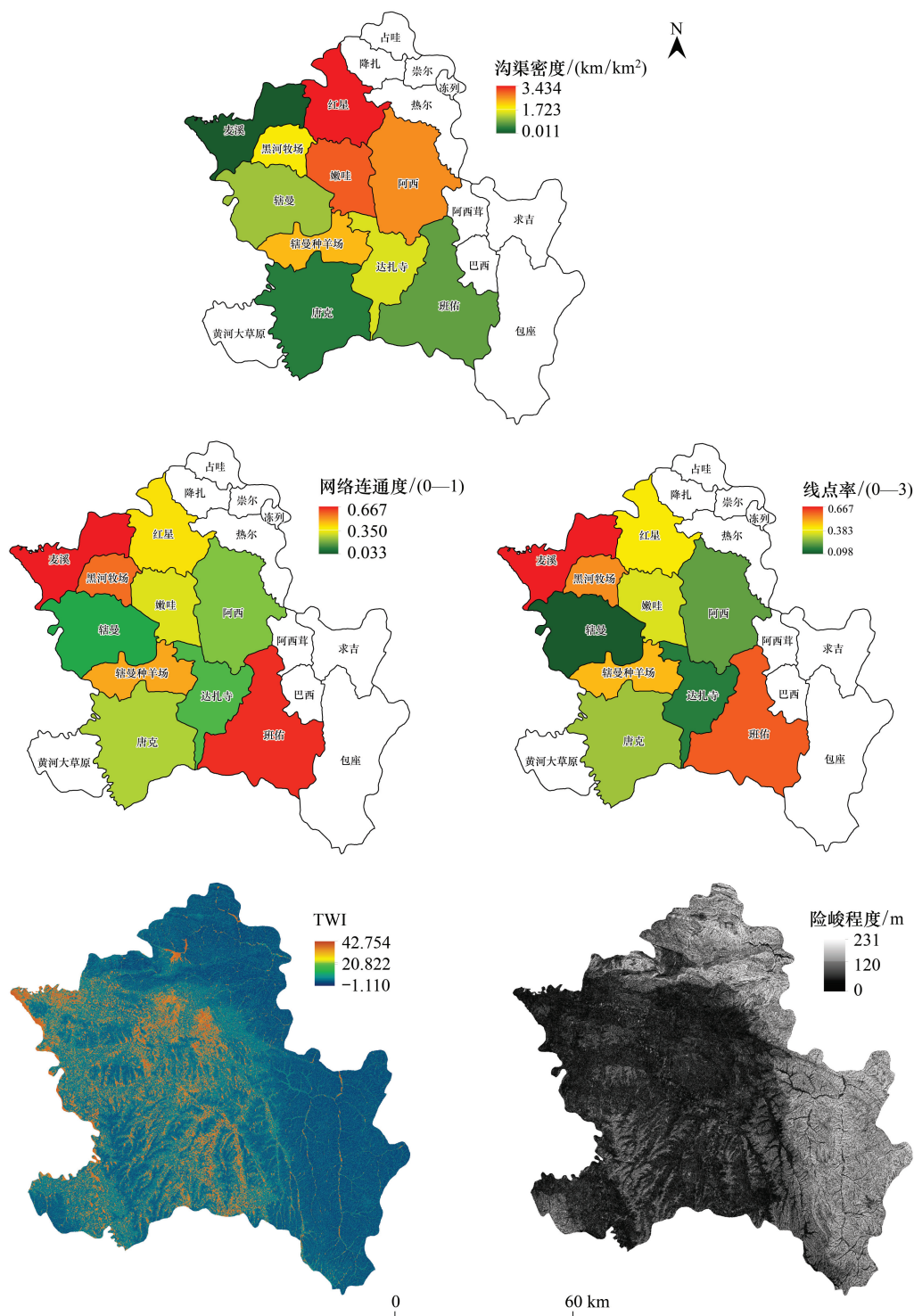


图3 若尔盖县水文地貌指标的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of hydrological and geomorphological indicators in Zoige County

积为 460 km^2 ; 波动变化区面积最小, 共计 22 km^2 。

稳态平衡区是湿地保持稳定不变的区域, 如黑河牧场、辖曼种羊场附近, 这些区域通常为湖泊或沼泽, 具有发达的水系, 地面平坦低洼, 地下水位持续高于表层土壤。波动变化区是非湿地和湿地动态转化的区域, 表现为湿地与非湿地之间的动态平衡, 其相互转化无显著方向、无明显规律。

退化转化区是湿地向非湿地转化的区域。由表 2 可知,退化转化区的沟渠密度和网络连通度平均值最大,该区域受到沟渠排水作用影响,导致水位不断下降,水位低于泥炭沼泽土表面,土壤厌氧环境遭到破坏,有机质分解加快,导致土壤养分释放,湿生和中生植物迅速发育,耗水量增大,加速湿地退化。随着地下水位的降低,土壤水分进一步减少,风毛菊 (*Saussurea* spp.)、毛茛 (*Ranunculus tanguticus*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*) 等高寒草甸植被逐渐占优势。

恢复转化区是非湿地不断向湿地转化的区域,由表 2 可知恢复转化区沟渠密度和网络连通度的平均值最小。自 1994 年若尔盖湿地自然保护区建立以来,当地采取了排水沟壑填堵等湿地水文工程恢复措施,使约 400 km² 的湿地水位得以提高,水位抬高形成的厌氧环境有利于泥炭土累积,形成厌氧环境,泥炭沼泽不断积累。生境由中生、旱生转向湿生,以垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、垂穗鹅观草 (*Roegneria nutans*) 等禾本科植物为优势种的群落向优势种为乌拉苔草 (*Carex meyeriana*)、木里苔草 (*Carex muliensis*)、眼子菜 (*Potamogeton distinctus* A. Bennett) 等湿生水生植物的群落转化,从而恢复沼泽湿地^[25]。这一过程证明适度的人工干预有助于非湿地向湿地转化,是促进湿地恢复的有效手段。

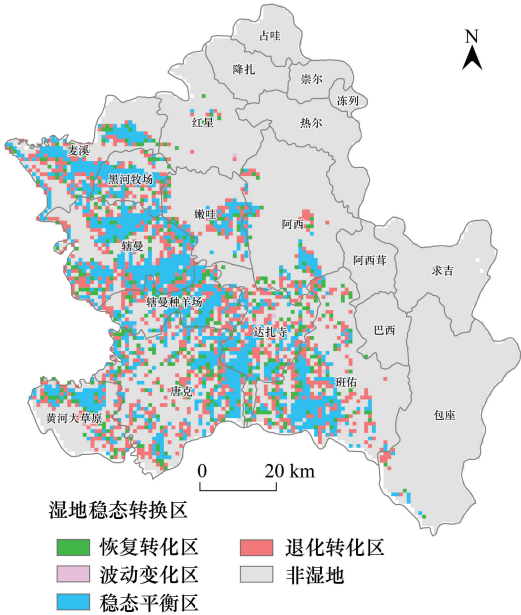


图 4 1980—2015 年若尔盖县湿地稳态转化区分布图^[24]
Fig.4 Distribution map of steady transition zone of wetland in Zoige County from 1980 to 2015

表 2 若尔盖县湿地稳态转化区沟渠密度和网络连通度差异

	沟渠密度 Ditch density/(km/km ²)			网络连通度 Network connectivity		
	最小值 Min	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Average	最大值 Max
恢复转化区 Recovery zone	0.011	0.360	3.434	0.033	0.054	0.082
稳态平衡区 Stable zone	0.011	0.376	3.434	0.033	0.106	0.667
波动变化区 Fluctuation zone	0.041	0.457	3.434	0.033	0.091	0.667
退化转化区 Degradation zone	0.011	0.636	3.434	0.033	0.185	0.667

3.2.2 生态阈值及调控范围

由于恢复转化区湿地稳态转化过程证明了人工干预的有效性,具有较强的现实意义。根据沟渠密度和网络连通度的负向指标性质,以恢复转化区作为生态阈值的标准,将恢复转化区的网络连通度和沟渠密度的最小值作为理想值,平均值作为临界值。二者的区间即若尔盖县网络连通度和沟渠密度的理想区间。用各乡镇网络连通度的理想值和临界值与实际值做减法运算,得到各乡镇网络连通度的生态阈值调控范围,同理计算沟渠密度生态阈值调控范围,为各乡镇制定具体的调控方案提供参考。基于 ArcGIS 10.2 叠加分析,得到网络联通度的理想值为 0.033,临界值为 0.054;沟渠密度的理想值为 0.011 km/km²,临界值为 0.360 km/km²,各乡镇的生态阈值调控范围见表 3。调控范围较低数值为理想值与实际值的差,较高数值为临界值与实际值的差。由表 3 可知,麦溪乡的沟渠密度最小,红星乡的沟渠密度最大,阿西乡、红星乡、嫩哇乡和辖曼种羊场的沟渠密度超出了理想区间,应填堵沟渠以改善水文条件。辖曼乡的网络连通度最小,麦溪乡的网络连通度最大,麦溪乡、班佑乡、黑河牧场、辖曼种羊场和红星乡的网络连通度已经超出了理想区间。麦溪乡沟渠数量较少,但是沟渠网络交错复杂,从而将湿地景观分割成块,导致湿地景观破碎化,因此麦溪乡需降低网络连通度,以

增强湿地景观连续性和均质性。

表 3 若尔盖县各乡镇网络连通度和沟渠密度及其调控范围

Table 3 Network connectivity and ditch density and control range of townships in Zoige County

地区 Area	沟渠密度 Ditch density/(km/km ²)	沟渠密度调控区间 Control range of ditch density/(km/km ²)	网络连通度 Network connectivity	网络连通度调控区间 Control range of network connectivity
阿西乡	0.487	-0.476—-0.127	0.048	-0.015—0.006
班佑乡	0.212	-0.201—0.148	0.082	-0.049—-0.028
达扎寺镇	0.263	-0.252—0.097	0.044	-0.011—0.01
红星乡	3.434	-3.423—-3.074	0.061	-0.028—-0.007
嫩哇乡	1.699	-1.688—-1.339	0.052	-0.019—0.002
唐克乡	0.042	-0.031—0.318	0.052	-0.019—0.002
辖曼乡	0.246	-0.235—0.114	0.033	0.000—0.021
辖曼种羊场	0.364	-0.353—-0.004	0.063	-0.030—-0.009
黑河牧场	0.285	-0.274—0.075	0.067	-0.034—-0.013
麦溪乡	0.011	0.000—0.349	0.667	-0.634—-0.613

3.3 湿地恢复优先性划分

在进行湿地恢复的过程中,首先确定关键调控指标,其次从空间上划分优先恢复湿地。通过熵值法本文已计算出若尔盖县湿地稳态转换的重要影响因素是网络连通度和沟渠密度,故本文以沟渠密度为 x 轴,网络连通度为 y 轴绘制散点图,计算图上各乡镇与理想区间的距离,距离越大则恢复等级越高。若尔盖县各乡镇湿地恢复等级采用自然断点法分三级(图 5)。一级恢复区包括麦溪乡、嫩哇乡和红星乡,其中麦溪乡应重点调控网络连通度,嫩哇乡和红星乡应重点调控沟渠密度;二级恢复区包括辖曼种羊场、阿西乡、班佑乡和黑河牧场;三级恢复区包括唐克乡、辖曼乡和达扎寺镇,应在保持现状的基础上,避免沟渠进一步开挖,以控制地下水位,防止沼泽疏干。

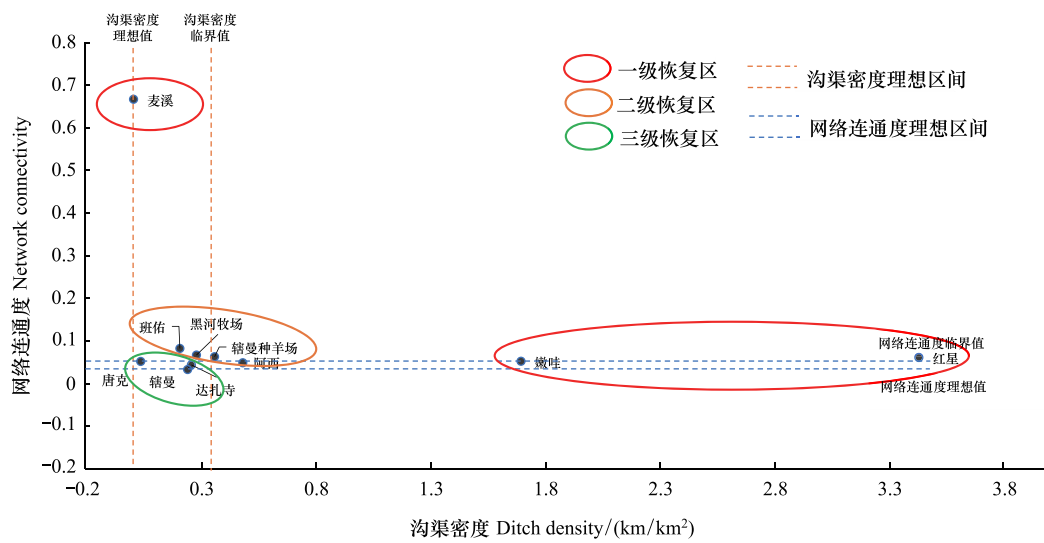


图 5 若尔盖县湿地优先恢复等级

Fig.5 Zoige county wetland priority recovery level

4 讨论

基于熵值法和生态阈值统计分析方法,本研究筛选出对若尔盖县湿地稳态转换影响最大的水文地貌指

标,并计算理想值和临界值两类生态阈值。与原来研究仅考虑要素自身变化率相比,本研究通过识别湿地稳态转换区,考虑了水文地貌条件对湿地稳态的作用,赋予生态阈值更多的地理和生态意义。阈值的确定方法灵活、操作性强,适用于难以获得连续数据的其他影响指标,加上其长期性和大尺度的视角,可以作为获得生态阈值的一种借鉴方法。

本研究计算得到的若尔盖县湿地稳态变化影响因素与其他学者研究比较一致。游宇驰等^[26]认为开挖沟渠改变了若尔盖沼泽的水流通道,导致在降雨期沼泽的积水沿沟渠被快速排走,使得沼泽脱水,引起地表水和地下水的水位下降。王元云等^[27]利用层次分析法探究若尔盖湿地变化的驱动因素,结果表明导致湿地面积减少的主要因子是超载放牧、挖沟排水等人为因素。本文在定义生态阈值理想区间时以湿地恢复作为期望状态,根据 Goffman 等人的研究^[2],一旦超过生态阈值,那么生态系统会偏离期望状态,即沟渠数量一旦超过临界值将不利于湿地的恢复,湿地稳态可能发生波动或退化,因此生态阈值研究对生态系统具有突出的预警意义。本研究关于若尔盖县湿地恢复优先性的结果与其他学者的研究有出入,高跃鹏等^[24]从景观变化的角度探究若尔盖县湿地恢复优先性,而本文更加关注湿地稳态转换的影响因素,从影响因素的角度划分恢复优先性,从而导致结果不同。一般来说,优先恢复区的退化湿地面积比例是最大的,但本文所划分的 10 个乡镇,其退化湿地面积比例均不超过 30%,且在方差分析中没有通过显著性检验,即各恢复等级的退化湿地面积比例无显著差异,因此在本研究区中不能将退化湿地所占比例作为划分湿地恢复优先性的依据。本文所采用的从影响因素的角度划分湿地优先恢复等级更符合研究区实际情况,从而为研究区湿地恢复提出更合理的建议。

表 4 各等级恢复区湿地退化面积比例差异

Table 4 Proportion of wetland degraded area ratios in each level of restoration area

组 Group	观测数 Number	求和 Sum	平均 Average	方差 Variance
一级恢复区 Primary restoration area	3	0.661036	0.220345	0.006687
二级恢复区 Secondary restoration area	4	0.857448	0.214362	0.011502
三级恢复区 Tertiary restoration area	3	0.687376	0.229125	0.001192

表 5 各等级恢复区湿地退化面积比例方差分析结果

Table 5 Analysis results of proportion variance analysis of wetland degradation area in each level of restoration area

差异源 Source of difference	SS	df	MS	F	P	F
组间 Between Groups	0.000374	2	0.000187	0.026035	0.974395	4.737414
组内 Within Groups	0.050263	7	0.00718			
总计 Total	0.050637	9				

从长远来看,若尔盖湿地的退化是气候变化和人类活动共同作用导致的,人为因素是在较短时间尺度造成湿地退化的重要影响因素^[28-30];过度放牧导致牲畜对沼泽化草甸的啃食和践踏十分严重,加速沼泽向草甸的逆向演替过程^[31],使湿地发生退化并难以恢复^[27];若尔盖湿地蕴藏丰富的泥炭资源,但若尔盖县泥炭的大量开采使得大面积泥炭沼泽干涸^[32-33]。由于本研究没有考虑气候变化、超载放牧和泥炭过度开采等因素的影响,因此影响若尔盖县湿地稳态转换的指标有待进一步的探讨。另外,鉴于湿地生态系统的复杂性,仅通过湿地稳态变化规律确定生态阈值,若尔盖县沟渠密度和网络连通度的理想值和临界值以及调控范围具有一定局限性。因此,本研究只是基于水文地貌指标和土地利用变化过程对若尔盖县湿地稳态转换的影响因素和生态阈值进行初步探讨,更加准确详细地辨识其随时间、空间和人为干扰因素对湿地的驱动作用,将有助于减少生态阈值研究的不确定性。

5 结论

本文以生态系统稳态转换理论为理论基础,利用熵值法筛选出影响若尔盖县湿地稳态转换的重要水文地

貌指标,通过探究湿地稳态转换规律厘定具体的生态阈值和调控范围,在乡镇尺度上确定湿地恢复优先性,从而为若尔盖县湿地稳态保持和恢复的时空顺序提供了参考。主要结论如下:

(1)若尔盖县湿地稳态转化区共四种,分别是恢复转化区、退化转化区、稳态平衡区和波动变化区。其中稳态平衡区面积最大,退化转化区次之,其面积占全县湿地面积的 35.88%。

(2)影响若尔盖县湿地稳态转换的重要水文地貌指标为网络联通度和沟渠密度。若尔盖县网络联通度的理想值为 0.033,临界值为 0.054;沟渠密度的理想值为 0.011 km/km^2 ,临界值为 0.360 km/km^2 。麦溪乡、班佑乡、黑河牧场、辖曼种羊场和红星乡超出网络连通度理想区间;红星乡、阿西乡、嫩哇乡和辖曼种羊场均超出沟渠密度理想区间。

(3)在若尔盖县需要进行湿地恢复的 10 个乡镇中,按恢复先后顺序分为三个等级,一级恢复区应优先恢复,二级恢复区次之,三级恢复区最后恢复。一级恢复区包括 3 个乡镇,即麦溪乡、嫩哇乡和红星乡;二级恢复区包括 4 个乡镇,即辖曼种羊场、阿西乡、班佑乡和黑河牧场;三级恢复区包括 3 个乡镇,即唐克乡、辖曼乡和达扎寺镇。

参考文献 (References):

- [1] 吴春莹. 长江中下游重要湖泊湿地生态健康遥感诊断[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [2] Groffman P M, Baron J S, Blett T, Gold A J, Goodman I, Gunderson L H, Levinson B M, Palmer M A, Paerl H W, Peterson G D, Poff N L, Rejeski D W, Reynolds J F, Turner M G, Weathers K C, Wiens J. Ecological thresholds: the key to successful environmental management or an important concept with no practical application? *Ecosystems*, 2006, 9(1): 1-13.
- [3] 刘吉平,董春月,刘家福,郑凯俊. 三江平原孤立湿地空间分布及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36(11): 3280-3291.
- [4] Curie F, Gaillard S, Ducharme A, Bendjoudi H. Geomorphological methods to characterise wetlands at the scale of the Seine watershed. *Science of the Total Environment*, 2007, 375(1-3): 59-68.
- [5] 张爱静. 水文过程对黄河口湿地景观格局演变的驱动机制研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [6] 宗敏,王光镇,韩广轩,栗云召,赵敏. 1976—2015 年黄河三角洲人工沟渠时空演变及驱动机制. *鲁东大学学报: 自然科学版*, 2017, 33(1): 68-75.
- [7] 张骁栋,康晓明,李春义,崔丽娟,王小文. 排水对三江平原和若尔盖沼泽生态影响的比较. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 2030-2040.
- [8] 游宇驰,李志威,陈敏建. 若尔盖高原日干乔大沼泽中人工沟渠分布与其排水量估算. *湿地科学*, 2018, 16(2): 223-230.
- [9] 李玉照,刘永,赵磊,邹锐,王翠榆,郭怀成. 浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法. *生态学报*, 2013, 33(11): 3280-3290.
- [10] 胡春明,刘平,张利田,李曜,西东升,康海全. 河漫滩湿地生态阈值——以二卡自然保护区为例. *生态学报*, 2013, 33(20): 6662-6669.
- [11] 吴东浩,于海燕,吴海燕,周斌,王备新. 基于大型底栖无脊椎动物确定河流营养盐浓度阈值——以西苕溪上游流域为例. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 483-488.
- [12] 王建兵,王素萍,汪治桂. 1971—2010 年若尔盖湿地潜在蒸散量及地表湿润度的变化趋势. *地理科学*, 2015, 35(2): 245-250.
- [13] Kværner J, Snilsberg P. The Romeriksporten railway tunnel—Drainage effects on peatlands in the lake northern Puttjern area. *Engineering Geology*, 2008, 101(3/4): 75-88.
- [14] 刘纪远,宁佳,匡文慧,徐新良,张树文,颜长珍,李仁东,吴世新,胡云锋,杜国明,迟文峰,潘涛,宁静. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.
- [15] 唐飞,陈曦,程维明,周可法. 基于 DEM 的准噶尔盆地及其西北山区地势起伏度研究. *干旱区地理*, 2006, 29(3): 388-392.
- [16] 马勇勇,李占斌,任宗萍,李鹏,鲁克新,李聪,汤珊珊,王添. 草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响. *农业工程学报*, 2018, 34(8): 170-176.
- [17] 卢涛,马克明,傅伯杰,倪红伟. 三江平原沟渠网络结构对区域景观格局的影响. *生态学报*, 2008, 28(6): 2746-2752.
- [18] 李玉凤,刘红玉,郑园,曹晓. 基于功能分类的城市湿地公园景观格局——以西溪湿地公园为例. *生态学报*, 2011, 31(4): 1021-1028.
- [19] Aavik T, Liira J. Quantifying the effect of organic farming, field boundary type and landscape structure on the vegetation of field boundaries. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(3): 178-186.
- [20] Huang S Z, Ming B, Huang Q, Leng G Y, Hou B B. A case study on a combination NDVI forecasting model based on the entropy weight method. *Water Resources Management*, 2017, 31(11): 3667-3681.
- [21] Toms J D, Villard M A. Threshold detection: matching statistical methodology to ecological questions and conservation planning objectives. *Avian Conservation and Ecology*, 2015, 10(1): 2.

- [22] Zhang J Z, Luo M T, Yue H, Chen X Y, Feng C. Critical thresholds in ecological restoration to achieve optimal ecosystem services; an analysis based on forest ecosystem restoration projects in China. *Land Use Policy*, 2018, 76: 675-678.
- [23] 刘路明, 彭明春, 王崇云, 董云霞. 滇池流域农业沟渠系统景观特征分析(英文). *农业科学与技术*, 2010, 11(4): 184-188.
- [24] 高跃鹏, 张学霞, 方宇, 张雪, 郭建斌. 若尔盖县景观破碎化及湿地恢复优先性. *中国农业大学学报*, 2019, 24(12): 145-158.
- [25] 陈克林. 若尔盖湿地恢复指南. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [26] 游宇驰, 李志威, 黄草, 曾杭. 1990—2016 年若尔盖高原荒漠化时空变化分析. *生态环境学报*, 2017, 26(10): 1671-1680.
- [27] 王元云, 何奕忻, 鞠佩君, 朱求安, 刘建亮, 陈槐. 层次分析法在若尔盖湿地退化研究中的应用. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(1): 46-52.
- [28] Hu G Y, Dong Z B, Lu J F, Yan C Z. Driving forces of land use and land cover change (LUCC), in the Zoige Wetland, Qinghai-Tibetan Plateau. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2012, 4(5): 422-430.
- [29] Pang A P, Li C H, Wang X, Hu J. Land Use/Cover Change in Response to Driving Forces of Zoige County, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1047-1082.
- [30] Shen G, Yang X C, Jin Y X, Xu B, Zhou Q B. Remote sensing and evaluation of the wetland ecological degradation process of the Zoige Plateau Wetland in China. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 48-58.
- [31] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 李珂. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式. *生态学报*, 2011, 31(20): 5946-5955.
- [32] 邓昭衡, 张雪雯, 高居娟, 高俊琴. 水分及凋落物对若尔盖泥炭土 CH_4 排放的影响. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(4): 548-552.
- [33] 王云川, 易桂花, 张廷斌, 别小娟, 王继斌, 孙姣姣. 近 35a 若尔盖高原泥炭沼泽变化趋势与驱动力分析. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 403-410.