

若尔盖高原湿地景观与环境要素的 DCCA 多元相关分析

叶 宇^{1,2}, 刘高焕¹, 黄 翀¹, 宁吉才¹, 李亚飞¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以9个指标反映若尔盖高原湿地生境的环境特征,在 ArcGIS 9.2 平台下进行随机样方布设,采用 DCCA 排序方法定量分析湿地景观与环境要素之间的关系。结果表明:(1) 排序前2轴累计解释了湿地景观与环境要素关系的79.4%,表明其具有有效的目标研究显示度;(2) 沿地形指数所近似表达的水分状况梯度,研究区各景观类型具有明显的分异特征,地形指数所反映的降水再分配是影响该区湿地景观空间分布的核心过程;(3) 海拔高程与坡度、地形指数,以及气温之间具有极显著相关性,地形不仅决定了区域总体上的水热分异格局,同时影响局部范围内的水分留存和涵养能力,是影响该区湿地景观的基本因素。

关键词: 若尔盖高原; 湿地景观; 除趋势典范对应分析; 地形指数

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00313

1 引言

湿地是由水陆相互作用而形成的自然综合体,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^[1]。水分是湿地生态系统最核心的生存条件和环境要素。湿地生态系统的存在依赖于湿地生境湿度,而湿地生境湿度的形成与维护主要取决于降水等气候因子与下垫面因素的耦合作用^[2]。在景观尺度上,湿地的空间分布具有明显的梯度特征,这种景观梯度特征是指由于环境梯度而导致的景观类型梯度差异^[3],主要源于地形对降水的再分配过程所导致的水分在空间上的异质分布。地形指数^[4]作为量化流域地形的一个重要物理指标,能够反映地表产流面积和产流过程的空间分布特征^[5]。在湿地研究中,地形指数及其改进算法被广泛用作近似表达水分空间分异状况的指标,用以刻画湿地生境特征和预测湿地空间分布^[6-8]。

湿地的形成、发育、分布及演替受水热等生境条件、相关环境因子,以及人为活动的影响,在景观尺度上,其分布格局具有渐变过渡、脆弱易损的特征。众多环境要素之间相互关联影响,各种生态过

程在不同尺度和水平上发生作用,因此,定量描述湿地景观与相关环境要素和生态过程之间的关系,不仅是深入认识湿地发育、变化机制的关键,同时也是湿地景观研究的难点。除趋势典范对应分析(DCCA, Detrended Canonical Correspondence Analysis)^[9]广泛应用于数量生态学领域,是根据物种多度构成来分析植被分异格局,并结合环境因子来解释这种分异内在机制的一种多元分析方法^[10-11]。本文应用 DCCA 方法,以地形指数作为水分状况的近似表达,结合区域湿地景观分类、基础地理数据,以及气象站点数据,分析若尔盖高原湿地景观与相关环境要素之间的关系,以揭示该区域湿地景观梯度特征及其主导因素。

2 研究数据与处理

若尔盖高原位于青藏高原的东北隅,西临巴颜喀拉山,东抵岷山,北起西倾山,南至邛崃山,是一完整的丘状高原^[12],为世界典型的高原湿地分布区,也是我国面积最大的高原泥炭沼泽的集中分布区。

本文选取若尔盖高原位于黄河源区的部分作为研究区域(图1),地处四川、甘肃、青海三省交界

收稿日期: 2011-02-11; 修回日期: 2011-05-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901223)资助。

作者简介: 叶 宇(1980-),男,博士研究生,主要研究方向:生态环境信息系统, E-mail: yey@lreis.ac.cn

处,面积约 $2.648 \times 10^4 \text{ km}^2$,地理位置为 $32^\circ 13' \sim 34^\circ 19' \text{ N}$, $100^\circ 47' \sim 103^\circ 26' \text{ E}$ 。研究区海拔 $3\,313 \sim 4\,779 \text{ m}$,属典型的大陆性高原寒温带湿润半湿润季风气候,长冬无夏、雨热同期,干湿分明。区域年均气温 $0.6 \sim 1.2^\circ \text{ C}$,绝对无霜期 $16 \sim 25$ 天, $>10^\circ \text{ C}$ 活动积温 $633.2 \sim 889.5^\circ \text{ C}$,年均降水 $660 \sim 750 \text{ mm}$ 。该区广泛发育沼泽土、泥炭土和草甸土,土壤冻结时间长,以还原作用为主。由于地质地貌、水文气候要素的独特特征,广泛发育和分布的高寒草甸和高寒沼泽化草甸是该区主要景观类型^[13-15]。

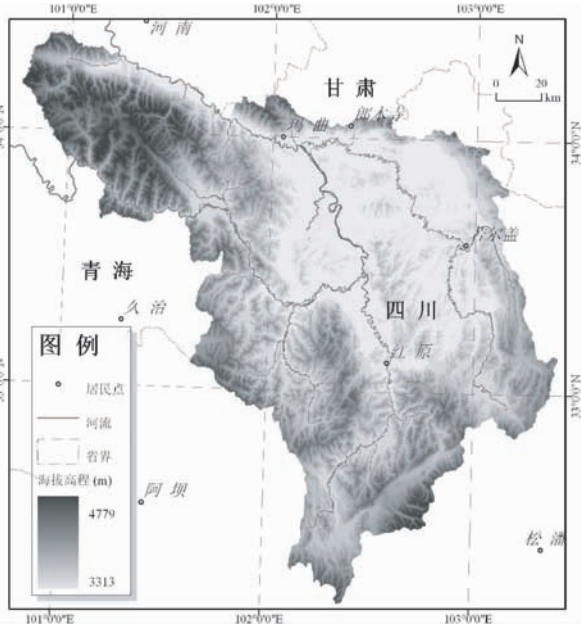


图1 研究区示意图

Fig.1 The location and elevation of the study area

2.1 数据源

本文所采用的数据包括:2009 年 7 月 28 日、2009 年 8 月 6 日、2009 年 9 月 5 日、2009 年 9 月 21 日覆盖研究区的共 6 景 TM 影像,作为 2009 年湿地景观分类图数据源;DEM 数据采用美国航空航天局(NASA)、美国国家图像测绘局(NIMA)与德国及意大利航天局合作的安装于“奋进”号航天飞机上的雷达获取的拓扑测绘数据 SRTM3(shuttle radar topography mission, 下载地址: <http://www.jpl.nasa.gov/srtm>),其空间分辨率 $3''$,约为 90 m ,水平和垂直精度分别为 20 m 和 10 m ^[16];气象站点观测年值数据来自中国气象科学数据共享网,包括观测站年降水、年均气温、风速,以及观测站经度、纬度和海拔高度记录;土壤数据(为属性数据),

采于中国科学院南京土壤研究所编制的中国 $1:100$ 万土壤数据库。根据《中国土系志》、《四川土壤志》、《甘肃省甘南藏族自治州土壤志》,参考各土壤亚类质地描述及相关物化指标,按表 7 对研究区各土壤亚类进行数值标识;交通数据采用国家基础地理信息中心 $1:100$ 万公路分布图(其空间数据均采用统一的地理坐标系)。

2.2 数据处理分析

参考 Ramsar 公约湿地分类系统,结合区域湿地实际状况,以及 Landsat TM 影像光谱特征,本文拟定了研究区湿地景观分类系统(表 6):主要包括 12 种景观类型,草甸是该区分布最广泛的景观类型,也是区域景观基质。湿地景观包括 6 种类型,其中高寒沼泽化草甸是该区主要湿地景观。为保证遥感分类精度,本研究采用人工解译结合实地调查的方法。根据实地采样验证,分类精度达到 96.3% 。

气温、降水等表征水热条件的数据来自于气象站点观测记录,由于气象台站空间分布不均、密度不足,本文采用气候数据曲面拟合专用软件 ANUSPLIN^[17]对气象数据进行内插。ANUSPLIN 基于薄盘光滑样条函数法,利用光滑参数来达到数据逼真度和拟合曲面光滑度之间的优化平衡,保证了插值曲面光滑连续,且精度可靠^[18-19]。以研究区内及邻近周边范围 32 个气象站点年值数据为基础,用于插值的气候变量包括 2009 年降水、年平均气温、年平均风速,以气象站经纬坐标为插值自变量,在气温的曲面拟合中以海拔高程为协变量,插值生成 90 m 分辨率栅格格式的气候变量表面(图 6(a)-(c))。

Beven 和 Kirkby 于 1979 年提出地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 的概念,将其作为反映流域地形的一个重要物理指标^[4]。地形指数能反映土壤水分、地表产流面积和产流过程的空间分布特征^[20],在水文模拟、生态监测、气候变化等领域有广泛应用与发展。

目前,各种数字地形分析方法(DTA)被应用于地形指数空间分布及累积频率分布的计算,例如, $D8^{[21]}$ 、 $Rho8^{[22]}$ 、 $FD8^{[23]}$ 、 $DEMON^{[24]}$ 等。地形指数的精确计算和表达在陆面过程定量化研究具有重要意义。研究^[25-26]表明:绝大多数情况下多流向算法计算获取的地形指数空间分布能更为准确地反映流域内的水文相似性。Quinn^[23]于 1991 年提

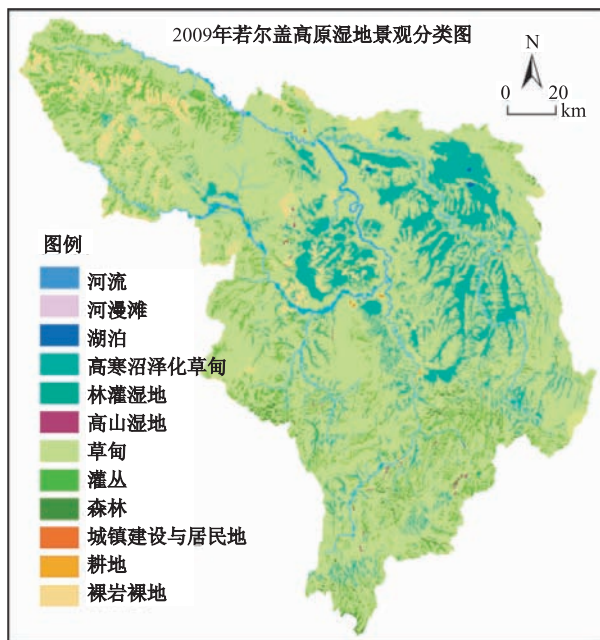


图 2 若尔盖高原湿地景观分类图

Fig. 2 Spatial distribution of wetland landscape in Zoige Plateau

出的多流向算法 FD8 已成为当前地形指数计算的主流方法。

地形指数表达式为 $\ln(\alpha/\tan\beta)$, 其中, α 为单位等高线长的上坡区域汇流面积, 它反映径流在流域中任一栅格位置上的累积趋势, 是单元栅格的总上坡有效面积 A 及与进入该单元栅格的流向垂直的有效等高线总长度 L 的比值, 即 $\alpha = A/L$; $\tan\beta$ 为单元栅格的坡度角, 反映重力作用下径流顺坡向下的运动趋势。

任一栅格的累积上坡汇流面积将通过下坡方向加权后的等高线长度分配至其周围 8 个方向中所有下坡方向的栅格中去, 这 8 个方向有主方向和对角方向之分, 在计算中具有不同权重, 加权后的等高线称为有效等高线, 有效等高线长度之和为 L , 即:

$$L = \sum_{i=1}^n L_i \quad (1)$$

L_i 为与下坡出流方向垂直的有效等高线长度, n 为单元栅格下坡方向的数量。由地形指数的定义可得:

$$\alpha/\tan\beta = A / \left(\sum_{i=1}^n L_i \tan\beta \right) \quad (2)$$

单元栅格的坡角为其下坡方向坡角的加权平均:

$$\tan\beta = \sum_{i=1}^n (\tan\beta_i / L_i) / \sum_{i=1}^n L_i \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式可得:

$$\ln(\alpha/\tan\beta) = \ln(A / \sum_{i=1}^n (\tan\beta_i L_i)) \quad (4)$$

计算单元栅格各下坡方向累积汇流面积 ΔA_i 如下:

$$\Delta A_i = A(\tan\beta_i L_i) / \sum_{i=1}^n (\tan\beta_i L_i) \quad (5)$$

上式中, A 为单元栅格总的上坡累积汇流面积; $\tan\beta_i$ 为第 i 个下坡方向的坡度; L_i 为与第 i 个下坡方向垂直的有效等高线长。

结合(4)、(5)两式可得:

$$\Delta A_i = (\alpha/\tan\beta)(\tan\beta_i L_i) \quad (6)$$

基于 DEM, 在计算每一个栅格的各下坡方向累积汇流面积 ΔA_i 的基础上, 进行迭代运算获取所有栅格点的累积汇流面积 A , 最后通过式(4)计算提取地形指数。

本文采用 Beven1995 年多流向思想设计的 GRIDATA TB^[27] 程序, 在 90m 分辨率 DEM 的基础上计算提取研究区地形指数(图 6(d)), 作为表征降水再分配过程和水分空间分异的量化指标。此外, 利用 ArcGIS 的空间分析和水文分析模块, 提取坡度、填洼深度作为反映研究区局部地形状况的环境因子(图 6(e)、(f))。

3 DCCA 的多元相关分析

DCCA 是目前数量生态学领域最常用的植被—环境关系多元数量分析方法之一, 它在除趋势对应分析(DCA)的基础上结合典范对应分析(CCA)方法改进而成^[28]。DCCA 排序轴包含种类组成信息, 也包括了环境因子信息, 具有精度高、克服了弓形效应、能结合环境因子等诸多优点, 并可直观地把环境因子、物种、样方同时表达在排序轴的坐标平面上, 已成为植被梯度分析与环境解释的趋势性方法^[29-30]。本研究将 DCCA 引入到湿地景观研究中, 排序分析所用的环境因子包括前述的海拔高程、坡度、填洼深度、地形指数、土壤类型、降水、气温和风速 8 个自然因子, 此外, 以样方所在位置到公路的距离作为反映人类活动强度的指标。

基于 ArcGIS 平台及其空间分析模块, 通过随机样方生成和图层叠置的方法进行取样。如图 3 所示, 根据均匀散布的原则在研究区内产生随机样

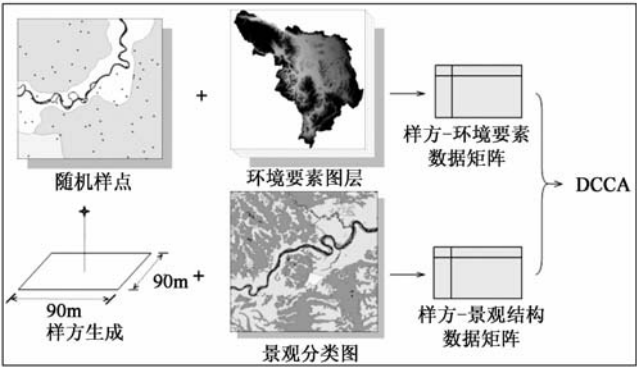


图 3 随机样方数据矩阵获取流程示意

Fig. 3 Flow of random quadrats & sample matrix acquisition

点,样点数量 $N_i = INT(a + S_i/b)$ 。式中, N_i 为第 i 种景观类型分布范围内的随机样点数量; S_i 为第 i 种景观类型的面积(km^2); a 、 b 为系数; $b=10$, 即大约平均每 10km^2 范围内产生 1 个随机样点; a 取值 20, 避免面积较小的景观类型中样点过少。为了与已有的栅格数据分辨率相匹配, 以每个随机样点为中心, 生成 $90\text{m} \times 90\text{m}$ 矩形样方。

表 1 2009 年研究区湿地景观结构

Tab. 1 Structure of wetland landscape in the study area, 2009

湿地景观	河流	河漫滩	湖泊	高寒沼泽化草甸	林灌湿地	高山湿地	小计
面积 (km^2)	220.97	63.68	14.26	2917.59	151.57	17.23	3385.30
比率 a (%)	0.83	0.24	0.05	11.01	0.57	0.07	12.78
比率 b (%)	6.53	1.88	0.42	86.18	4.48	0.51	100.00
非湿地景观	草甸	灌丛	森林	城镇建设与居住用地	耕地	裸岩裸地	
面积 (km^2)	20394.62	1679.03	203.78	13.72	15.37	796.11	23102.62
比率 a (%)	77.00	6.34	0.77	0.05	0.06	3.01	87.22

比率 a 为代表景观面积占研究区总面积的比率; 比率 b 为湿地景观结构比率, 即湿地景观面积/湿地总面积。

研究区总体湿地率为 12.78%, 湿地景观以高寒沼泽化草甸为主, 其面积为 2917.59km^2 , 占区域总面积的 11.01%, 占湿地总面积的 86.18%, 主要分布于黑河、白河中下游和玛曲县东南部的闭流、伏流宽谷区。

3.2 DCCA 排序结果分析

(1) 研究目标显示度的排序分析

DCCA 的排序分析的特征值总和为 0.814, 其中, 前 4 轴累计值占特征值总和的 83.3%, 而前两轴的累计值占 79.4%, 表明 4 个轴集中了湿地景观—环境因子关系信息的绝大部分, 而前两轴已经可

叠置随机样方图层和湿地景观分类矢量图层, 统计计算样方内各景观类型面积比率作为衡量景观重要值的指标, 由此建立样方景观组成矩阵。叠置随机样方和公路图层, 计算各样方到公路的最短距离; 叠置各自然环境因子图层, 根据样方位置提取环境因子值, 从而得到样方环境因子矩阵。在此基础上, 采用生态学软件 CANOCO 4.5 进行排序分析。

3.1 湿地景观分布的基本特征

湿地景观分类图(图 2)显示, 研究区草甸景观广泛分布于山地及丘陵地带的坡地、阶地和宽谷, 其面积占研究区总面积的 77.00%(表 1), 是区域的景观基质。灌丛主要分布于山地阴坡、沟谷两侧, 占研究区总面积的 6.43%。裸岩与裸地面积达 796.11km^2 , 其中裸岩主要分布于研究区西北部山地高海拔陡坡地段, 裸地则分布于低海拔丘陵地区, 多由草甸和沼泽化草甸退化形成, 部分区域沙化现象严重。

以反映研究区景观—环境关系的基本面貌和特征(表 2)。环境要素第一轴与景观类型第一轴之间相关系数为 0.847, 环境要素第二轴与景观类型第二轴之间相关系数为 0.686, 均达到极相关显著($P < 0.001$), 说明湿地景观分布与所选择的环境因子之间具有密切关系。

表 2 排序轴特征值及景观—环境相关性

Tab. 2 Eigenvalues and correlations of DCCA axes

	Axis1	Axis2	Axis3	Axis4
排序特征值	0.413	0.148	0.074	0.043
景观—环境相关系数	0.847	0.686	0.449	0.253
特征累积贡献率	58.7	79.4	83.2	83.3

(2)排序轴与环境要素的相关性

基于第 1、2 排序轴与环境要素的对应相关(表 3),4 个环境因子与第一排序轴达到显著相关。第一轴上,按绝对值大小,以与地形指数的相关性最大,为 0.8003($P<0.001$);其次为坡度与海拔高程,相关性分别为 $-0.6245(P<0.01)$ 、 $-0.5037(P<0.01)$;再次为年平均气温,相关性 0.4839($P<0.05$)。

表 3 环境因子与排序轴间的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients for axes and environmental factors

项目	排序轴	
	景观第一轴	景观第二轴
景观第二轴	-0.0177	
环境第一轴	0.8466 ***	0.0000
环境第二轴	0.0000	0.6862 ***
与道路的距离	-0.0187	-0.4322 *
土壤类型	-0.3726	0.6029 **
填洼深度	0.3821	0.0185
坡度	-0.6245 **	0.0536
地形指数	0.8003 ***	0.1809
年平均气温	0.4839 *	-0.0270
年降水	-0.2117	0.0348
海拔高程	-0.5037 **	0.0799
年平均风速	0.1156	0.0821

相关性检验: * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$

第二轴上,土壤类型与之呈极显著正相关($0.6029,P<0.01$);其次为与道路的距离,相关性为 $-0.4322(P<0.05)$ 。排序第一轴主要反映了地形及其所引起的水分(地形指数)和温度空间分异的变化梯度;排序第二轴则主要反映了土壤类型、人为活动影响(与道路距离)的变化趋势。

(3)湿地景观与环境要素之间的相关分析

对 12 种景观类型与 9 种环境要素的排序结果(图 4)显示,湿地景观与非湿地景观在空间分布上存在明显的分异。6 类湿地景观均分布于第 1 轴的正值空间,水分、温度以及填洼深度与湿地景观的分布呈显著的正相关。非湿地景观类型中,草甸、灌丛、森林和裸地 4 种自然景观类型则处于第 1 轴负值区域,随着海拔高程增加、坡度变大,这几类景观的分布范围和面积比率相应上升。

排序图第 1 轴所反映的环境要素变化趋势中,

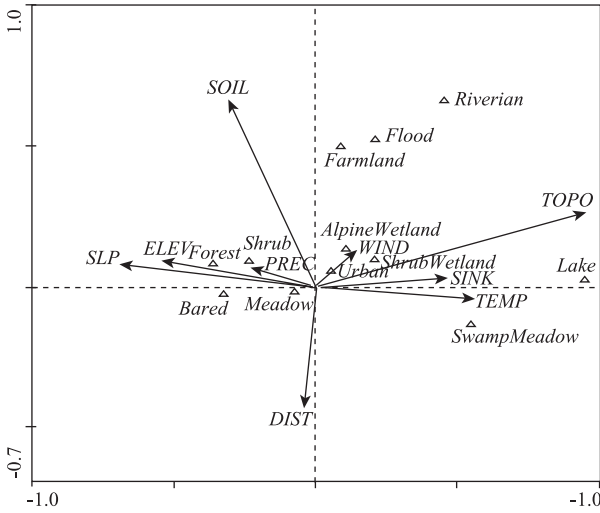


图 4 若尔盖高原湿地景观与环境关系的 DCCA 排序图

Fig. 4 DCCA ordination diagram of wetland landscape and environmental variables in Zoige Plateau

排序图中箭头代表环境因子,DIST: 与道路的距离;SOIL: 土壤类型;SINK: 填洼深度;SLP: 坡度;TOPO: 地形指数;TEMP: 年平均气温;PREC: 年降水;ELEV: 海拔高程;WIND: 年平均风速。“△”代表景观类型,riverian: 河流;floodplain: 河漫滩;lake: 湖泊;swamp meadow: 高寒沼泽化草甸;shrub wetland: 林灌湿地;alpine wetland: 高山湿地;meadow: 草甸;shrub: 灌丛;forest: 森林;urban: 城镇建设与居住地;farmland: 耕地;bared: 裸岩裸地。不同景观类型之间的卡方距离反映它们的空间分异程度,箭头与景观类型之间的相对位置则反映它们之间的相关关系。

代表水分空间分布的地形指数具有最强的典范相关关系。同时,各景观类型沿地形指数梯度呈明显的分异态势,自然景观类型由湿润至干旱依次为:湖泊、河流、高寒沼泽化草甸、河漫滩、林灌湿地、高山湿地、高寒草甸、灌丛、林地以及裸岩裸地。为了揭示景观类型与地形指数之间的统计显著关系,本文运用多重回归方法获得了 t -value 双序图(图 5)。该图包含景观类型箭头,以及环境因子的 Van Dobben circles, t -value 来自于以景观为因变量,以环境因子为自变量的多重回归的回归系数。双序图显示,研究区多种景观类型显著依赖于地形指数,地形指数所代表的水分空间分布状况是影响区域湿地景观的最重要因素。6 种湿地景观箭头均处于实线圈内,表明研究区湿地景观均与地形指数显著正相关,湿地景观的面积比率随地形指数的增大而增加。4 种非湿地自然景观箭头均处于虚线圈内,说明这 4 类景观的面积比率随地形指数的减小而增大,呈显著的负相关关系。

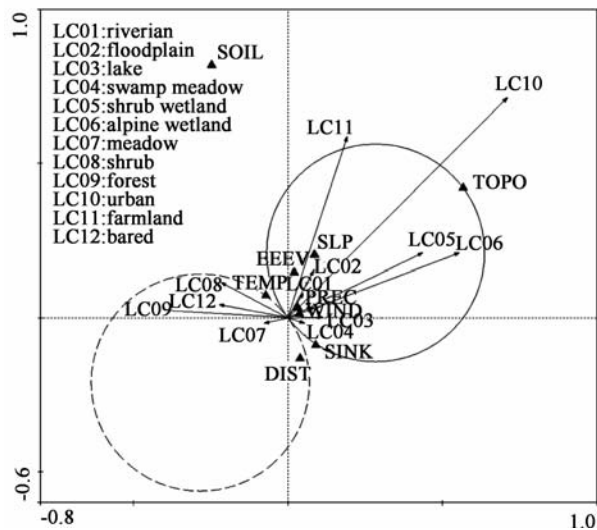


图5 地形指数与湿地景观类型的 t-value 双序图

Fig. 5 T-value biplot ordination diagram of topographical index

在 t-value 排序图中,箭头代表景观类型,“▲”代表环境因子;图内代表环境要素与景观类型的英文标注与图 4 含义一致;实线圈刻画了排序空间内的正相关区域,虚线圈则代表负相关的范围。

就温度而言,如图 4 所示,高寒沼泽化草甸、林灌湿地与年平均气温之间呈显著正相关。若尔盖高原地处大陆性高原寒温带,长冬无夏,年均气温较高的区域能保证具有相对充足的活动积温,是湿地植被发育、生长的重要条件。填洼深度与湖泊景观显著正相关,对湖泊的分布有很强的指示性。同时,该指标对高寒沼泽化草甸等典型湿地景观类型

也具有一定的正向影响,但它与排序第 1 轴相关性为 0.3821,其典范相关关系较弱。

土壤类型具有较强的典范相关关系,是排序图第 2 轴所反映的环境要素梯度的主要构成。整体而言,土壤类型与区域景观类型之间相关性显著,但随着若尔盖高原湿地逐年退化,处于逆向演替进程、变化迅速的湿地景观与相对稳定、变化缓慢的下垫面土壤类型之间的典范对应相关性也在逐渐削弱。反映在排序图中,各自然景观沿土壤类型梯度没有明显的分异。道路距离与研究区景观的整体格局之间具有显著相关性,但它与各湿地景观类型之间的典范对应关系在排序图中反映的并不明显。此外,降水和风速两个因子与排序轴没有达到统计学上的相关性,与研究区湿地景观没有明显关系。

(4)环境要素之间的相关性

分析显示(表 4),海拔高程与气温、坡度、地形指数之间相关性极显著,分别为 $-0.956 (P < 0.001)$ 、 $0.718 (P < 0.001)$ 和 $-0.643 (P < 0.01)$,此外,海拔高程与填洼深度之间也略呈负相关关系。随着海拔的上升,坡度呈增大的趋势,而气温和地形指数则随之降低。海拔高程不仅影响区域水热状况的空间分异,同时也影响坡度、填洼深度所代表的局部地形特征。表 4 还表明,随着坡度的降低,地形指数呈上升的趋势,两者相关性达 $-0.750 (P < 0.001)$,局部地形特征影响水分的留存与涵养,是水分空间分异格局最重要的影响因素。

表 4 环境因子之间的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between environmental variables

	与道路的距离	土壤类型	填洼深度	坡度	地形指数	年平均气温	年降水	海拔高程
土壤类型	-0.127							
填洼深度	-0.013	-0.097						
坡度	0.169	0.207	-0.294					
地形指数	-0.121	-0.179	0.377	-0.750***				
年平均气温	-0.234	-0.249	0.232	-0.675**	0.595**			
年降水	-0.001	-0.059	-0.106	0.114	-0.201	0.074		
海拔高程	0.219	0.278	-0.355	0.718***	-0.643**	-0.956***	0.134	
年平均风速	-0.035	0.179	0.088	-0.047	0.140	-0.016	-0.458*	-0.075

4 结论与讨论

本研究在 GIS 方法与数据的基础上,选择 9 种

环境因子,采用设置随机样方的方式,将 DCCA 排序技术应用于景观尺度上湿地空间分布与环境要素的多元定量分析。虽然这种方法不能从机理上完全厘清若尔盖高原湿地景观的形成机制,但是比

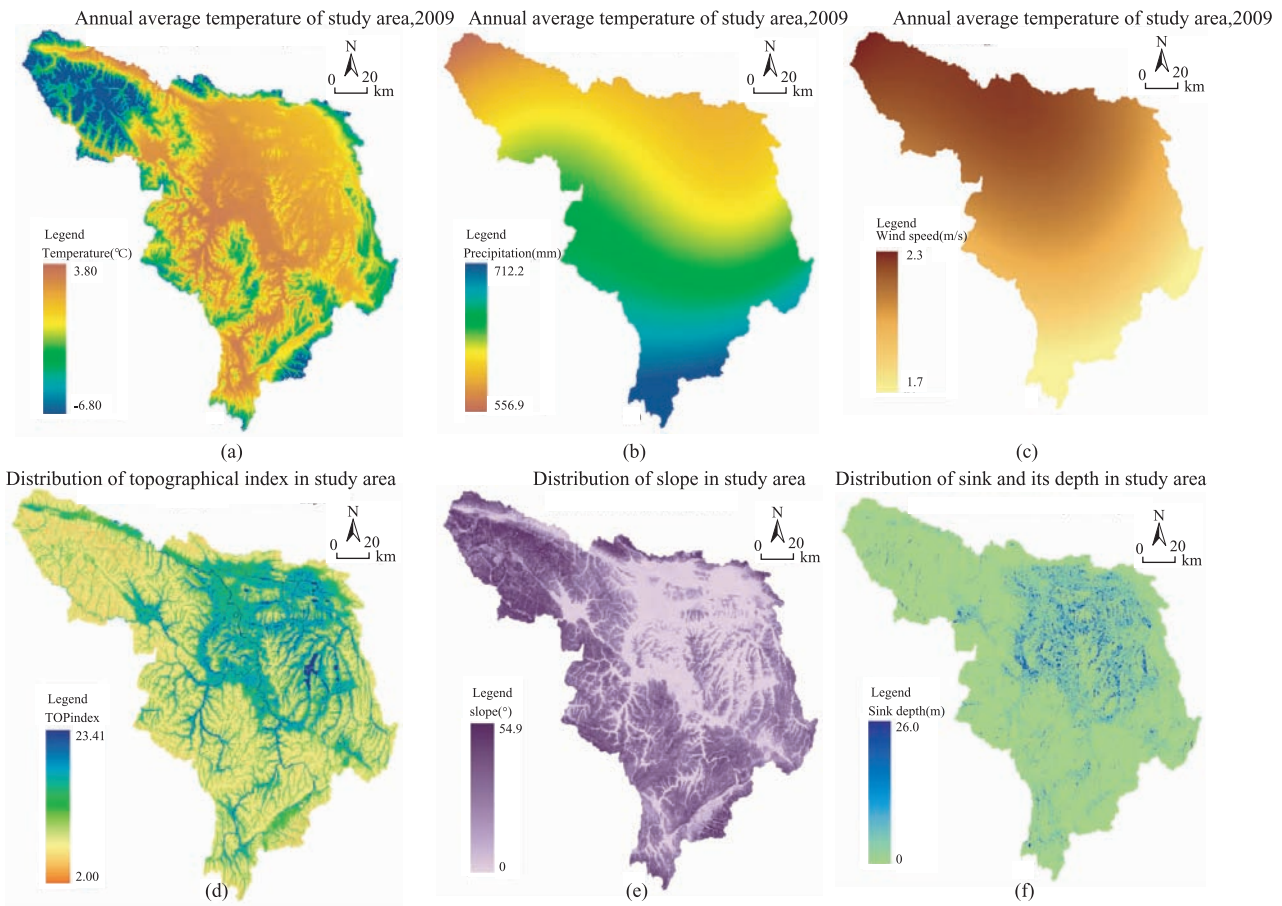


图 6 研究区部分环境要素的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of several environmental factors in the study area

a – f in order are spatial distribution of annual average temperature in 2009, spatial distribution of annual precipitation in 2009, spatial distribution of annual average wind speed in 2009, spatial distribution of topographical index in the study area, spatial distribution of slope, spatial distribution of sink and its depth.

表 6 若尔盖高原湿地景观分类系统

Tab. 6 Classification system of wetland landscape in Zoige Plateau

景观类型		说明
湿地景观	河道湿地	常年性、季节性或暂时性河流及支流
	河漫滩	季节性洪泛湿地,包括河漫滩、河心洲
	湖泊	
	高寒沼泽化草甸	常年或季节、临时性积水,以木里苔草、乌拉苔草、藏嵩草等植被为群落优势种,多发育泥炭
	林灌沼泽	泥炭灌丛、矮树灌丛沼泽、森林泥炭地等
	高山湿地	高山苔原、融雪形成的暂时性水域
非湿地景观	高寒草甸	广泛分布于山地及丘陵地带的坡地、阶地和宽谷,植被以嵩草属、蓼属、杂类草、禾草为主
	高寒灌丛	山地阴坡、沟谷两侧多有分布,以高山柳一小叶杜鹃群落、高山绣线菊群落为典型
	林地	分布于丘状高原外围的山原地带,以云杉、冷杉为主
	耕地	
	裸岩与裸地	裸岩多分布于高海拔山地陡坡地带,裸地多位于黑合、白河下游缓丘地带,部分区域沙化严重
城镇与居民地		

表 7 土壤类型数值标识表

Tab. 7 Rule of numerical identification for soil types

土壤亚类	数值标识	土壤亚类	数值标识	土壤亚类	数值标识	土壤亚类	数值标识	土壤亚类	数值标识
低位泥炭土	1	沼泽土	5	黑毡土	9	草甸土	13	寒冻土	17
泥炭沼泽土	2	草甸沼泽土	6	棕黑毡土	10	黑钙土	14	冲积土	18
高位泥炭土	3	潜育草甸土	7	棕草毡土	11	棕壤	15	江河河床	19
腐泥沼泽土	4	湿草毡土	8	草毡土	12	石灰性草甸土	16		

较清晰地揭示了若尔盖高原湿地景观与主要环境要素之间的重要关系。

(1)作为水分空间分异状况的近似表达,地形指数在 DCCA 排序中与景观分布具有高度的典范对应关系。水分是湿地生境的最重要因素,而降水再分配是影响若尔盖高原湿地景观空间分布的核心过程。

(2)海拔高程与 DCCA 排序第 1 轴显著相关。与此同时,环境因子之间的相关性分析表明,海拔高程与地形指数和气温之间极显著相关,它在很大程度上决定了区域水热状况的空间分布。此外,海拔高程也深刻影响坡度和填洼深度所代表的局部地形地貌特征。综上,由于水热条件,以及局部地形所代表的水分留存和涵养能力是湿地生境的重要组成,因此,在景观尺度上,海拔高程所代表的地形是影响研究区湿地分布的最基本要素。

(3)降水是该区湿地形成、发育的基本条件。但 DCCA 分析显示,年降水这一指标与排序轴相关性极小。研究区年降水在空间上呈南部略多、北部略少的格局(图 6b),这一未经地形再分配过程的水分格局与区域湿地景观空间分布之间不存在明显的典范对应关系。

(4)填洼深度反映了局部地形地貌状况和水分留存能力。本文 DCCA 排序显示,填洼深度与研究区湿地景观相关性并不显著。其原因可能是由于该指标从 90m×90mDEM 数据中提取,这一分辨率条件下的数据概化致使其难以准确表达填洼分布与深度的真实状况。

参考文献:

[1] 陈宜瑜. 中国湿地研究[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995.

[2] Rodriguez I. Eco-hydrology: A Hydrological Perspective of Climate-Soil-Vegetation Dynamics[J]. Water Resources Research, 2000(36): 3-9.

[3] 刘红玉, 李兆富. 流域湿地景观空间梯度格局及其影响

因素分析[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 213-220.

[4] Beven K J, Kirkby M J. A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology [J]. Hydrological Science Bulletin, 1979, 24: 43-69.

[5] Beven K J, Kirkby M J, Schofield N, *et al.* Testing a Physically-based Flood Forecasting Model (TOPMODEL) for Three U. K. Catchments[J]. Journal of Hydrology, 1984, 69: 119-143.

[6] Rodhe A, Seibert J. Wetland Occurrence in Relation to Topography: A Test of Topographic Indices as Moisture Indicators[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999(98): 325-340.

[7] Merot P, Squivant H, Aurousseau P, *et al.* Testing a Climato-topographic Index for Predicting Wetlands Distribution along an European Climate Gradient[J]. Ecological Modelling, 2003(163): 51-71.

[8] Curie F, Gaillard S, Ducharne A, *et al.* Geomorphological Methods to Characterise Wetlands at the Scale of the Seine Watershed[J]. Science of the Total Environment, 2007(375): 59-68.

[9] 张金屯. 模糊数学及其应用[J]. 生态学报, 1992, 12(4): 325-331.

[10] 索安宁, 洪军, 林勇, 等. 黄土高原景观格局与水土流失关系研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1719-1723.

[11] 喻庆国. 基于自然度的森林景观时空分异研究[D]. 北京林业大学, 2007.

[12] 孙广友, 张文芬, 张家驹, 等. 若尔盖高原沼泽生态环境及其合理开发的研究[C]. // 陈宜瑜(主编). 中国沼泽研究. 北京: 科学出版社, 1988, 305-314.

[13] 中国科学院西部地区南水北调综合考察队. 若尔盖高原的沼泽[M]. 北京: 科学出版社, 1965.

[14] 孙广友. 横断山区的沼泽与泥炭[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[15] 田应兵, 熊明彪, 熊晓山, 等. 若尔盖高原湿地土壤—植物系统 SOC 的分布与流动[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 490-495.

[16] 汪凌. 美国航天飞机雷达地形测绘使命简介[J]. 测绘通报, 2000(12): 38-40.

- [17] Hutchinson M F. ANUSPLIN Version 4.3 User Guide[R]. Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, Canberra, 2004.
- [18] Hutchinson M F. Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines, Part I: Two Dimensional Smoothing of Data with Short Range Correlation[J]. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 139 - 151.
- [19] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, *et al.* Very-High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 1965 - 1978.
- [20] Zhang W, Montgomery D R. Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation, and Hydrological Simulation[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(4): 1019 - 1028.
- [21] Jenson S K, Domingue J O. Extracting Topographic Structures from Digital Elevation Data for Geographic Information Systems Analysis[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(11): 1593 - 1600.
- [22] Fairfield J, Leymarie P. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models[J]. *Water Resource Research*, 1991, 27: 709 - 717.
- [23] Quinn P, Beven K J, Planchon O. The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modeling Using Digital Terrain Models[J]. *Hydrological Processes*, 1991, 5: 59 - 79.
- [24] Costa-Cabral M C, Burges S J. Digital Elevation Model Networks (DEMON): A Model of Flow over Hillslopes for Computation of Contributing and Dispersal Areas[J]. *Water Resource Research*, 1994, 30: 1681 - 1692.
- [25] Giuseppe M, Aurella S. Information Content Theory for the Estimation of the Topographic Index Distribution Used in Topmodel[J]. *Hydrological Process*, 1997, 11: 1099 - 1114.
- [26] Moore I D. Hydrological and GIS[C]. // Goodchild M F, Steyaert L T, Parks B O, *et al.* (Eds.). *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*[J]. Fort Collins, 1995.
- [27] Beven K J. DTM9501 and GRIDA TB: Digital Terrain Analysis: A User's Guide to the Distribution Versions (95.01)[R]. <http://www.es.lancs.ac.Uk/hfdg/topmodel.html>
- [28] Terbraak C J F. Canonical Correspondence Analysis: A New Eigenvector Technique for Multivariate Direct Gradient Analysis[J]. *Ecology*, 1986, 67: 1167 - 1179.
- [29] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [30] Wang Y J, Tao J P, Zhang W Y, *et al.* Vegetation Restoration Patterns and Their Relationships with Disturbance on the Giant Panda Corridor of Tudingling, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26: 3525 - 3532.

Analysis on Relationship between Wetland Landscape and Environmental Factors in Zoige Plateau Based on DCCA

YE Yu^{1,2}, LIU Gaohuan¹, HUANG Chong¹, NING Jicai¹, LI Yafei¹

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Nine indices, such as elevation, topographical index, precipitation, temperature, soil, etc, were used to define the environmental characteristics of wetland habitats in Zoige Plateau. Based on ArcGIS 9.2 platform, scatter quadrats were randomly generated, sample-environmental factors matrix and sample-landscape structure matrix were obtained through spatial analysis module. And then, a DCCA was used to quantitatively analyze the roles of the environmental factors and their effects on the spatial

distribution of wetland landscape. The results suggest that: 1) the first two DCCA axes explained 79.4% of the relationships between environmental influence and wetland distribution, suggesting that DCCA was an effective analysis technique at landscape scale. 2) There is no evident correlation (-0.2117 , 1st axis; 0.0348 , 2nd axis) between precipitation and wetland distribution, meanwhile, various wetland landscapes changed obviously along the moisture gradient (0.8003 , $P < 0.001$, 1st axis), which was represented approximately by topographical index. Precipitation redistribution by topography and geomorphology was core process in formation of wetland landscape spatial distribution. 3) Elevation significantly correlated to slope, topographical index and annual average temperature, suggesting that not only the spatial differentiation of hydrothermal regime but also the water conservation ability in local area were deeply influenced by terrain. Terrain was the basic influence factor of wetland landscape in the study area. 4) The 2nd DCCA axis was mainly composed of soil type (0.6029 , $P < 0.01$) and the distance to road (-0.4322 , $P < 0.05$). These two factors had important impact on wetland landscape of Zoige Plateau. Above all, applying DCCA which is widely used in quantitative ecology areas for multivariate analysis is helpful to understand the relations between wetland distribution and environmental factors at landscape scale in Zoige Plateau. And topographical index is an effective indicator in delineating the moisture differentiation and wetland distribution.

Key words: Zoige Plateau; wetland landscape; detrended canonical correspondence analysis; topographical index