文章编号:2097-096X(2022)04-0295-11

水足迹视角下辽宁省春玉米生育期水土资源匹配特征研究

曹永强，张若凝，冯兴兴

(辽宁师范大学 地理科学学院，辽宁 大连　116029)

摘要：随着气候变化及种植结构调整，农业水土资源配置状况发生改变，研究农业水土资源匹配特征对农业可持续发展具有重要意义。基于作物生产水足迹视角，采用广义农业水土资源匹配系数的计算方法，对1985—2018年辽宁省春玉米生育期的水土资源匹配特征进行分析。结果表明：1985—2018年间辽宁省春玉米农业水土资源匹配系数变化波动明显，总体以14 $m^3/(hm^2\cdot a)$增长，多年平均农业水土资源匹配系数值为5733 m^3/hm^2。同时，1985—2018年间辽宁省春玉米农业水土资源匹配状况呈现向好趋势，东部农业水土资源匹配良好的地区增多，西北部农业水土资源匹配较差的范围缩小。未来辽宁省玉米种植结构调整，应立足各地区农业水土资源匹配特征，构建水土资源空间均衡的农业生产体系。

关键词：农业水土资源匹配；水足迹；时空变化；种植结构；辽宁省

中图分类号：F323.21；K909　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13244/j.cnki.jiwhr.20210002

1　研究背景

农业水土资源是一个地区农作物种植必不可少的自然条件，不仅关乎粮食安全与社会稳定，也影响着区域经济发展和生态环境保护[1]。伴随社会经济快速发展和人口增长，粮食需求日益增加，对土地和水资源的利用强度不断加剧[2-3]。同时，由于气候变化和人类活动影响，水土资源利用效率、农作物种植结构及水热、水土格局都在改变[4-6]。农业水土资源日益短缺与粮食生产需求之间的矛盾日益凸显，农业可持续发展面临严重挑战。

目前，国内外学者在农业水土资源研究方面已取得显著成果，研究方向主要集中在农业水土资源的利用状况[7-8]、匹配程度[9]、承载力[10]以及优化配置[11]等方面。对水土资源的匹配状况进行准确的评价和把握，则是开展相关工作的前提和基础[12]。国外关于水土资源研究更侧重水资源与土地利用之间相互影响和反馈作用，对二者之间匹配度研究则较少[13]。SHEN等[14]和Nelson等[15]通过引入基尼系数分别对西班牙埃布罗河盆地农田灌溉用水和作物产量之间关系和气候变化下水资源匹配情况做了研究。国内关于农业水土资源匹配度的研究成果颇丰，推动了我国区域内水资源和土地资源耦合理论及其优化配置集体研究的发展。侯薇等[16]通过农业水土资源匹配系数法分析评价了关中地区及所辖5个地级市的农业水土资源匹配程度，并提出了相应优化调控措施。耿庆玲[17]对西北干旱区农业水土资源的丰缺程度及匹配特征进行了研究，提出了农业水土资源有效匹配的途径及方法。传统的水土资源匹配研究大多基于灌溉用水视角，进而测算单位耕地面积拥有或可利用的农业用水量，多适用于灌溉农业[18-19]。Falkenmark、Allan以及Hoekstra先后优化了农作物用水分析理论[20-22]，这种广义的农业用水分析工具从水足迹理论下的“绿水”、“蓝水”入手，为全面评价农业水土资源匹配格局提供了新的视角[23-24]。

辽宁省作为全国粮食主产区之一，在保障国家粮食安全中占据重要地位，对农业水土资源依赖程度也相对较高。同时，玉米是辽宁省第一大种植作物，在粮食生产中起着至关重要作用，而玉米

收稿日期：2021-01-03；网络首发时间：2021-08-16

网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210813.1553.001.html

基金项目：国家自然科学基金面上项目(52079060)；辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10200043)；“兴辽英才计划”高水平创新创业团队项目(XLYC2008033)

作者简介：曹永强(1972-)，博士生导师，教授，主要从事水文水资源研究。E-mail：caoyongqiang@lnnu.edu.cn

生产多以雨养为主，这对区域水土资源配置水平提出了更高需求。鉴于此，本文从生产水足迹视角，结合农业水土资源匹配系数内涵，深入探究1985—2018年间辽宁省玉米种植的水土资源匹配特征，旨在有针对性地为辽宁省玉米生育期水土资源的合理利用与保护提供重要的理论依据。

2 研究条件与方法

2.1 研究区概况 辽宁省位于38°43′N—43°26′N，118°53′E—125°46′E之间，地处东北地区南部，总面积14.8万 km^2。在《全国新增1000亿斤粮食生产能力规划（2009—2020年）》中，辽宁省定位为粮食生产核心区。其中，玉米种植在粮食生产中占据重要位置，其12个地级市均以玉米为第一种植作物[25-26]。辽宁省属温带大陆性季风气候，且受海洋性气候影响显著；年平均气温7 ℃ ~ 11 ℃，年降水量为600 ~ 1100 mm，时空分布不均，多集中7—8月份，且东部多西部少。近年来，受气候变化和极端天气事件影响，东北地区降水量减少，总体气候呈现暖干化的特点，农业生产活动受到较大影响[27-28]。

2.2 数据来源 本文数据主要包括1985—2018年辽宁省气象数据、农业统计数据和作物数据等相关数据。其中，气象数据源于中国气象网（http：//data.cma.cn/wa），具体包括辽宁省19个气象站点（见图1）经度、纬度和海拔高度等地理数据，以及日平均气温、最高气温、最低气温、平均风速、日照时数及平均相对湿度等气象数据；其他数据源于《中国统计年鉴》，主要包括玉米产量数据、播种面积、灌溉面积及化肥施用量等数据；作物数据源于实际生产经验、前人已有成果研究以及《辽宁省抗旱资料汇编》等相关资料[29-31]，包括生育期数据（4月11日—9月20日）和作物系数 K_c（见表1）。

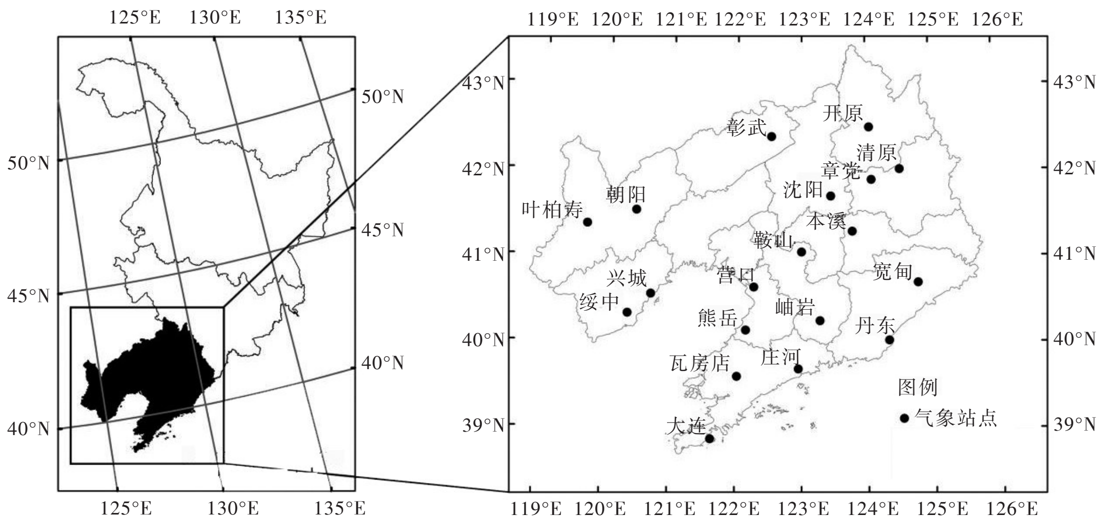


图1 辽宁省气象站点分布图

2.3 研究方法

2.3.1 *农作物生产水足迹* 农作物生产水足迹是指单位质量农作物在生长过程中所消耗的广义水资源量[32]，包括绿水足迹、蓝水足迹及灰水足迹。绿水足迹指农作物生长期所需的降水总量，蓝水足迹指农作物所需的灌溉用水及地表水量，灰水足迹指农作物生长过程中对污染物稀释的水资源量[33]。本研究中主要使用绿水足迹和蓝水足迹[34]。根据Hoekstra等[22]提出农作物生产水足迹的计算框架，计算玉米生产水足迹：

$$WF = WF_{green} + WF_{blue} \tag{1}$$

$$WF_{green} = \frac{10 \cdot ET_{green}}{Y} \tag{2}$$

$$WF_{blue} = \frac{10 \cdot ET_{blue}}{Y} \tag{3}$$

$$ET_{green} = \min\left(ET_c,\ P_{eff}\right) \tag{4}$$

表1　辽宁省春玉米作物系数统计

时间/(月旬)	辽宁西部	辽宁北部	辽宁东部	辽宁南部	辽宁中部
4月中	0.36	0.35	0.53	0.50	0.37
4月下	0.46	0.44	0.55	0.57	0.42
5月上	0.47	0.45	0.63	0.64	0.47
5月中	0.51	0.46	0.65	0.74	0.53
5月下	0.55	0.48	0.71	0.82	0.50
6月上	0.58	0.51	0.87	0.88	0.69
6月中	0.68	0.62	0.94	0.97	0.81
6月下	0.80	0.81	1.02	1.06	0.94
7月上	0.91	0.93	1.12	1.12	1.17
7月中	1.17	1.14	1.15	1.21	1.27
7月下	1.21	1.16	1.27	1.26	1.29
8月上	1.02	1.08	1.21	1.20	1.20
8月中	0.97	0.98	1.16	1.09	0.96
8月下	0.95	0.93	1.01	0.88	0.91
9月上	0.91	0.89	0.94	0.78	0.85
9月中	0.78	0.79	0.76	0.76	0.85

$$ET_{blue} = \max\left(0，ET_c - P_{eff}\right) \tag{5}$$

式中：WF为农作物生产水足迹，m^3/t；WF_{green}为绿水足迹，m^3/t；WF_{blue}为蓝水足迹，m^3/t。ET_{green}和ET_{blue}分别为绿水和蓝水蒸散量，mm；Y为作物产量，t /hm^2；ET_C为农作物蒸散量，mm；P_{eff}为作物生长期有效降水量，mm。

农作物蒸散量根据Penman–Monteith模型(联合国粮食及农业组织FAO推荐)，计算农作物参考蒸散量ET_0，之后使用作物系数K_c对ET_0进行修订，获得具体农作物蒸散量ET_C[32]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta\left(R_n - G\right) + \gamma \dfrac{G_n}{T + 273} u_2\left(e_s - e_a\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + G_d \cdot u_2\right)} \tag{6}$$

$$ET_C = K_C \cdot ET_0 \tag{7}$$

式中：R_n为净辐射，MJ/(m^2·d)；G为热通量密度，MJ/(m^2·d)；T为日平均温度，℃；u_2为2 m高处风速，m/s；e_s为饱和空气水汽压，kPa；e_a为空气水汽压，kPa；Δ为饱和水汽压–温度曲线的梯度，kPa/℃；γ为湿度计常数；G_n、G_d为固定常数，在估算逐日潜在蒸散发量时取值分别为900和0.34；K_C为作物系数。

有效降水量采用美国农业部土壤保持局推荐的USDA SCS方法来计算：

$$P_{eff} = \begin{cases} P\left(125 - 0.6P\right)/125，& P \leqslant 125/3 \\ 125/3 + 0.1P，& P > 125/3 \end{cases} \tag{8}$$

式中P为旬降水量，mm，作物生长期有效降水量逐旬累积。

2.3.2　*农业水土资源匹配系数*　水土资源匹配反映的是两种资源的平衡状况，最先由刘彦随提出，农业水土资源匹配系数是衡量区域农业生产可供水资源与土地资源在时空上的匹配的适宜量比关系[35]，旨在揭示一定尺度的农业水资源与土地资源的时空分配的均衡状况与满足程度[11]；农业水土资源匹配系数越大，表明农业水土资源匹配度越高。广义的农业水资源量包括农作物生育期潜在的有效降水量“绿水”和灌溉用水“蓝水”[36]。本文依据文献[32–34]，通过辽宁省玉米作物生产水足迹(WF)计算广义的春玉米生育期水资源量与当期作物实际种植面积的比值，测算广义的农业水土资源匹配系数(WL_{match})，测算模型如式(9)所示：

$$WL_{match} = WF / A \tag{9}$$

式中：WL_{match}为广义的农业水土资源匹配系数，m^3/hm^2；A为单位质量玉米作物种植面积，hm^2/t。

2.3.3 普通克里金插值法 克里金插值即空间局部插值法。已知采样点的统计特性，若区域化变量存在空间相关性，则可运用普通克里金空间内插法对区域化变量进行线性估计[37]。与反距离权重插值相比，克里金插值精确度更高，效果更加，且更注重插值样点及相邻样点统计特性的联系[38]。本文采用普通克里金空间插值法，基于辽宁省19个气象站点的春玉米生育期农业水土资源匹配系数对该省春玉米水土资源空间匹配格局的总体特征进行空间分析。

3 结果与分析

3.1 春玉米生育期农业水土资源匹配系数的时间分析 绿水足迹是天然状况下的农业所需水量，而蓝水足迹是灌溉水量，受人为调配，与纯天然的“绿水”是两个维度，文章分别从“绿水”和“蓝绿水”视角出发，探究比较辽宁省仅考虑绿水足迹和蓝绿水足迹共同影响下的春玉米生育期水土资源匹配时空分布格局，以期反映天然状况和人为调配后的匹配程度差异。基于作物生产水足迹的计算公式，从“绿水”和“蓝绿水”视角出发，计算1985—2018年辽宁省春玉米生产水足迹，进而得到广义的农业水土资源匹配系数，绘制春玉米水土资源匹配系数的时间变化趋势图(图2)。如图2所示，研究时段内“绿水”与“蓝绿水”视角下的辽宁省春玉米农业水土资源匹配变化均波动明显，“绿水”视角下水土资源匹配总体以12.77 $m^3/(hm^2 \cdot a)$呈下降趋势，年平均匹配系数值为4278 m^3/hm^2，而“蓝绿水”视角下水土资源匹配总体以14 $m^3/(hm^2 \cdot a)$增长，年平均匹配系数值为5733 m^3/hm^2。根据平均值，可将春玉米农业水土资源匹配状况大致分为3个阶段。第一阶段：1985—1996年，此阶段绿水足迹下春玉米农业水土资源匹配系数占蓝绿水足迹下匹配系数的83%，“蓝绿水”视角下水土资源匹配系数低于研究时段平均值，为5454 m^3/hm^2。随着农村经济体制的改革，农业发展得到大力支持，各地纷纷扩大种植面积，因此农业水土资源匹配系数较低。第二阶段：1997—2004年，此阶段农业水土资源匹配系数波动较大，“蓝绿水”视角下平均值为6162 m^3/hm^2，明显高于其他阶段。主要原因是受辽宁省降水量增多的影响，农作物水足迹较高，农业水土资源匹配系数也明显较高。此外，“绿水”视角下的农业水土资源匹配占“蓝绿水”视角下匹配系数的62%，可见天然降水补给下水土资源匹配程度明显低于人为调配后的匹配程度，原因为此时段春玉米生长期受到不同程度春旱的影响，且人工供水重视度提高，灌溉水的充分利用有效地解决了以降水补给为主的旱田农业的发展问题。第三阶段：2005—2018年，此阶段“绿水”视角下的农业水土资源匹配系数占“蓝绿水”视角下匹配系数的75%，蓝绿水视角下水土资源匹配系数为5727 m^3/hm^2，较第二阶段有所降低，而“绿水”视角下水土资源匹配系数较上个阶段有所增加。在此阶段受到国家政策和地方政策积极引导以及农田

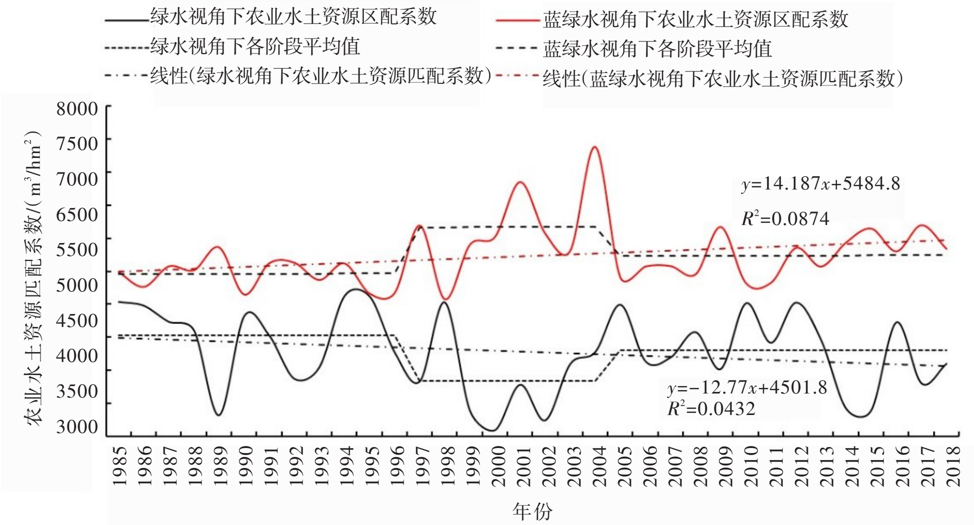


图2 1985—2018年绿水与蓝绿水视角下辽宁省春玉米农业水土资源匹配系数

设施完善等措施[39]，粮食单产上升，但由于气候变化引起的降水量的减少，农业水土资源匹配程度较上个阶段有所下降。因受降水量变化和作物种植面积和产量变化的影响，辽宁省春玉米不同时期农业水土资源匹配系数发生变化。整体来看，30年来仅考虑“绿水”的水土资源匹配程度在“蓝绿水”共同作用下的水土资源匹配程度占比降低，可见辽宁省春玉米需水量中的人为调水作用重要性在提升。辽宁省干旱程度加剧和极端天气的增加[40]，农业灌溉科技也在进步，春玉米旱田对天然降水的依赖程度减小，而更多的采取人为应对措施进行灌溉水源补给，以维持春玉米产量的总体稳定。

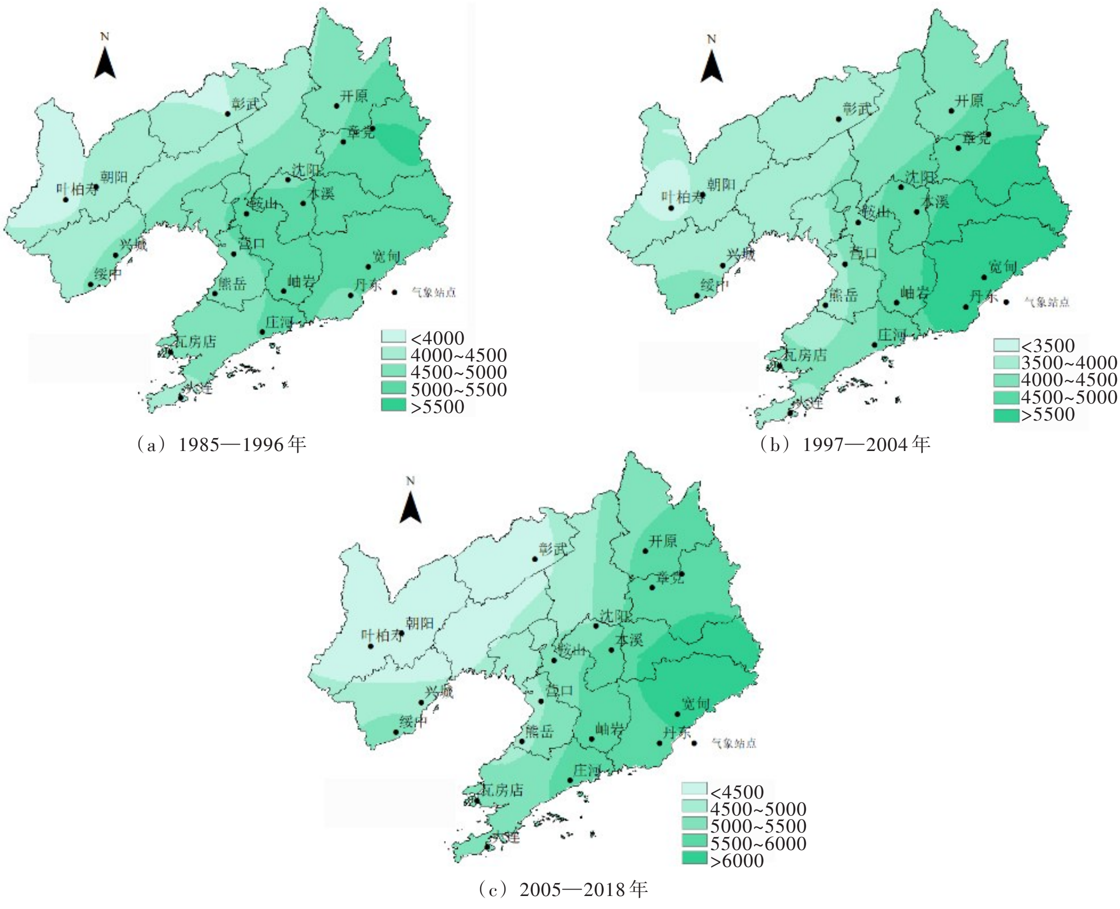
3.2 春玉米生育期农业水土资源匹配系数的空间分析

3.2.1 *各站点春玉米生育期农业水土资源匹配系数* 基于作物生产水足迹公式，分别计算出1985—2018年辽宁省19个站点春玉米生产“绿水”和“蓝水”足迹，进而得到广义的农业水土资源匹配系数(表2)。辽宁省1985—1996年仅考虑“绿水”的各站点春玉米生育期的水土资源配置平均值为4765 m^3/hm^2，加上“蓝水”后平均值为5023 m^3/hm^2，其中“绿水”和“蓝绿水”视角下的水土资源匹配系数均低于平均值的站点有7个，分别为彰武、开原、朝阳、叶柏寿、绥中、瓦房店、大连，另外，兴城和熊岳的春玉米水土资源匹配系数在“绿水”视角下低于平均值，加上“蓝水”后高于平均值，而丹东恰好与之相反。1997—2004年“绿水”视角下各站点春玉米生育期的农业水土资源配置平均值为4334 m^3/hm^2，“蓝绿水”视角下平均值为4571 m^3/hm^2，其中“绿水”和“蓝绿水”视角下的水土资源匹配系数均低于平均值的站点有9个，较上个阶段增加了兴城和熊岳，而丹东则高于平均值，另外，“绿水”视角下鞍山和营口春玉米水土资源匹配系数低于平均值，“蓝绿水”视角下低于平均值的站点为庄河。2005—2018年“绿水”视角下各站点春玉米生育期的水土资源配置平均值为5215 m^3/hm^2，“蓝绿水”视角下平均值为5837 m^3/hm^2，其中“绿水”和“蓝绿水”视角下的水土资源匹配系数均低于平均值的站点有5个，较上个阶段增加了沈阳，另外，营口、熊岳、瓦房店和大连在“绿水”视角下的水土资源配置低于平均值，而“蓝绿水”视角下绥中、岫岩和丹东低于平均值。在纯天然水资源量无法满足玉米生长期需水量时，通过灌溉用水的人为调配，以达到较好的水土资源匹配程度。总体而言，彰武、开原、朝阳、叶柏寿、绥中、沈阳以及兴城等站点春玉米生育期农业水土资源配置状况较低，瓦房店、庄河、大连以及丹东地区在不同时期变化明显。主要原因是辽宁省西北部地区降水量较少，年均仅有400 mm左右，干旱事件发生较多，中部虽是降水量适中的平原地区，但研究时段内也发生了持续时间长、强度大的干旱事件[40-41]；南部地区受降水量变化的影响，不同时期春玉米生育期农业水土资源匹配系数不同。

3.2.2 *春玉米生育期农业水土资源空间匹配格局总体变化特征* 为深入研究1985—2018年辽宁省春玉米生育期农业水土资源空间匹配格局的总体变化状况，根据该省“绿水”和“蓝绿水”视角下各站点春玉米生育期农业水土资源匹配系数变化分析(表2)，运用普通克里金空间插值法对辽宁省春玉米生育期农业水土资源匹配系数值进行空间划分，并绘制农业水土资源匹配空间分布图，结果如图3和图4所示。不同时期辽宁省春玉米生育期农业水土资源空间匹配格局存在较大差异：1985—1996年，“绿水”和“蓝绿水”视角下农业水土资源匹配较高地区分别为东部及中部大部分地区，辽西北及南部地区农业水土资源匹配较低，大连农业水土资源匹配最低；而清原、宽甸及鞍山在仅考虑绿水足迹的水土资源匹配程度最高，鞍山和营口两地在蓝绿水足迹视角下的水土资源匹配程度最高(图3(a)和图4(a))。1997—2004年，“绿水”和“蓝绿水”视角下辽宁省春玉米农业水土资源匹配整体较上个阶段明显降低，由西北向东南呈减少趋势，西北部及南部地区农业水土资源匹配较低的面积增大，东部及中部地区农业水土资源配置也都明显降低，宽甸、丹东等地相比其他地区农业水土资源配置较好(图3(b)和图4(b))。2005—2018年，在这个阶段农业水土资源能够匹配状况整体明显增高，呈西北-东南条状分布，其中宽甸、鞍山、营口、熊岳等中东部地区在考虑蓝绿水足迹的农业水土资源匹配较高，以此向西北、东南方向农业水土资源匹配降低，其中，叶柏寿-朝阳-彰武一线及周边地区农业水土资源匹配最低，而仅考虑“绿水”的水土资源匹配高的地区仅有丹东东北部和本溪西部，自东向西呈递减趋势(图3(c)和图4(c))。整体来看，三个时段内，绿水视角下春玉米水土资源匹配系数高于5000 m^3/hm^2空间分布面积占全省总面积的比例分别为35%、19%和57%，而蓝绿水视角下同

表2　基于水足迹的辽宁省春玉米农业水土资源匹配系数　　　　（单位：m^3/hm^2）

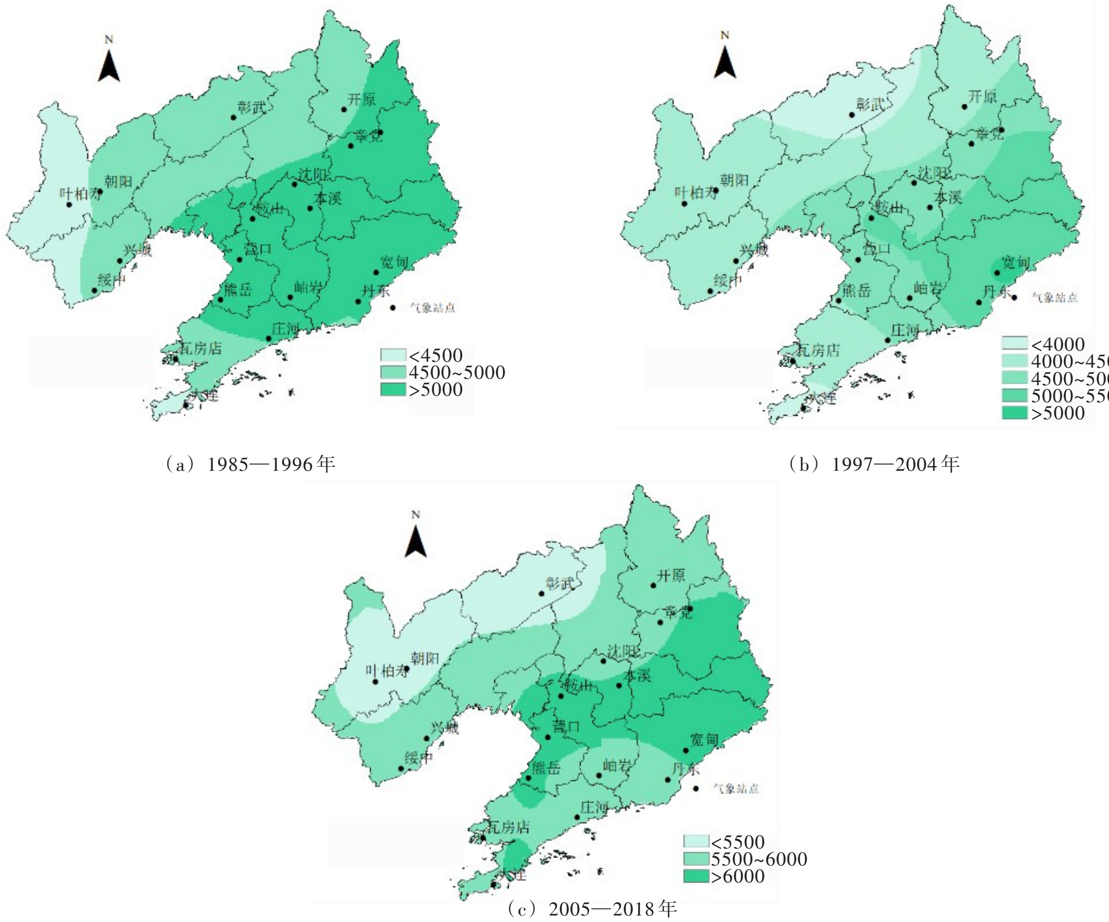
站点	气象站点	1985—1996年		1997—2004年		2005—2018年	
		“绿水”	“蓝绿水”	“绿水”	“蓝绿水”	“绿水”	“蓝绿水”
54236	彰武	3987	4534	3706	3706	4264	5183
54254	开原	4744	4744	4298	4298	5655	5744
54259	清原	5539	5539	4961	4961	5823	6069
54324	朝阳	4160	4905	3594	4283	3862	5285
54326	叶柏寿	3819	4782	3356	4112	3999	5405
54339	鞍山	5271	5819	4331	5090	5269	6433
54342	沈阳	4952	5190	4671	4671	5026	5584
54346	本溪	5054	5054	4850	4850	5904	6225
54351	章党	5038	5038	4734	4734	5833	5928
54454	绥中	4546	4546	4287	4287	5286	5507
54455	兴城	4590	5035	3897	4486	4752	5807
54471	营口	4906	5587	3990	4806	4935	6033
54476	熊岳	4591	5350	3595	4485	4830	6032
54486	岫岩	5067	5067	4854	4854	5752	5752
54493	宽甸	5318	5318	5571	5571	6150	6150
54497	丹东	4932	4932	5223	5223	5794	5794
54563	瓦房店	4642	4642	4221	4221	5159	5998
54584	庄河	5053	5053	4484	4484	5780	5998
54662	大连	4316	4316	3732	3732	5005	5979
均值		4764	5024	4334	4571	5215	5837



（a）1985—1996年　　（b）1997—2004年

（c）2005—2018年

图3　“绿水”视角下辽宁省春玉米农业水土资源空间匹配特征（单位：m^3/hm^2）



（a）1985—1996年

（b）1997—2004年

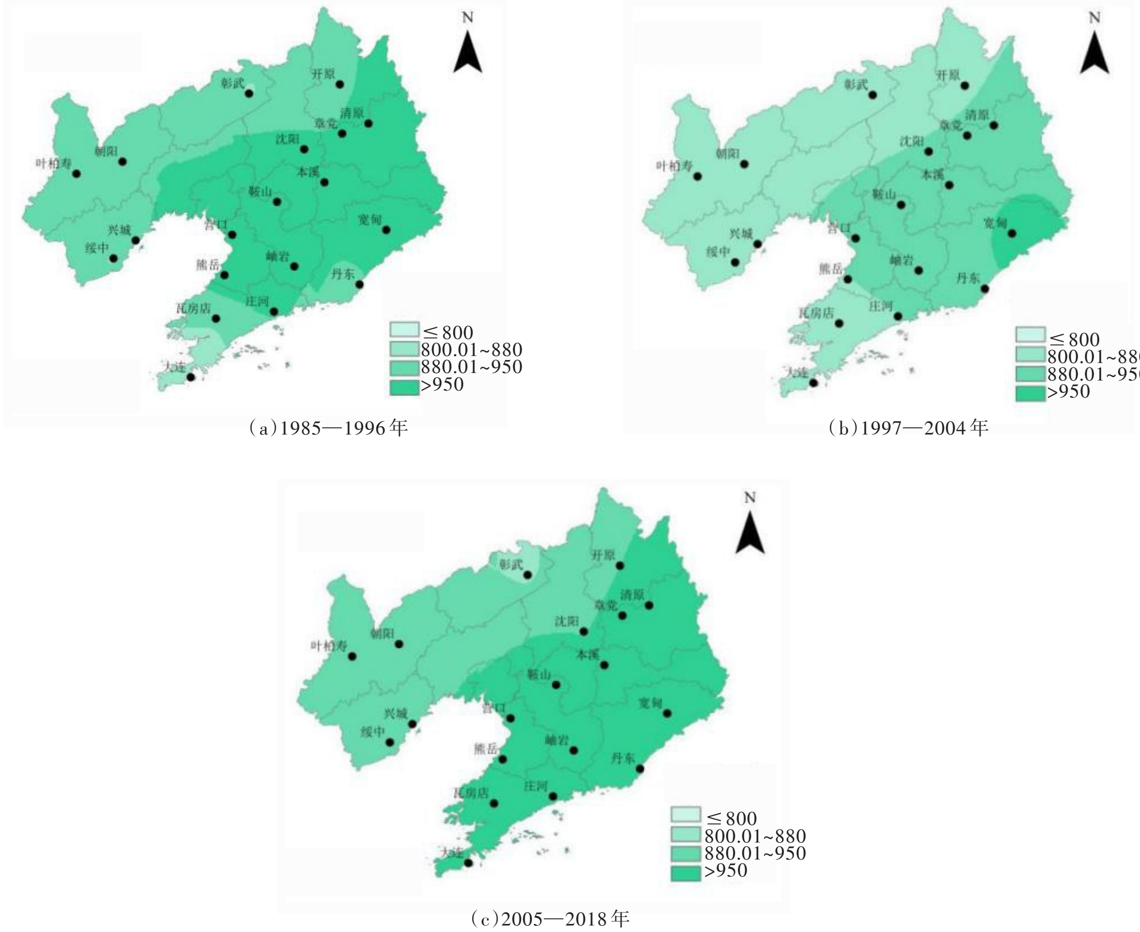
（c）2005—2018年

图4 “蓝绿水”视角下辽宁省春玉米农业水土资源空间匹配特征（单位：m^3/hm^2）

样水土资源匹配系数的空间分布面积占全省总面积的47%、21%和100%。随着农业科技提高和水资源调配政策的优化，辽宁省春玉米生育期水土资源匹配程度呈向好态势，东-中-西部水土资源配置情况逐渐降低，东部地区春玉米因其受地形地貌、气候条件及不同地区种植结构不同等条件的影响，“绿水”资源量充足，而西部地区大陆性气候特点明显，降水较少，需人为调配满足玉米作物的水土资源匹配。辽宁省同一时期不同地区间农业水土资源存在较大差异，这也为其种植结构优化的精细调整，水资源以及土地类型的利用提出了更高要求。

4 讨论

自1985年以来，受全球气候变化及人类活动双重影响，辽宁省地区玉米种植从由雨养为主向雨养-灌溉兼具的农业生产类型转变，随之其农业水土资源配置状况也发生改变。一方面，由于降水量时空分布差异导致农作物生产水足迹发生变化（见图5），农业生产可利用的水资源量随之变化，农业水土资源配置与之改变。本文在对辽宁省1985—2018年3个时期的研究中，不同地区降水量年际变化不同，尤其1997—2004年间，由于降水量总体减少，辽宁省春玉米生育期水足迹下降，随之农业水土资源配置状况整体下降，辽西北地区变化尤其明显。降水量是其农业水土资源空间配置的“先天条件”。另一方面，随着全球气候变化影响，辽西北地区增温明显[42]，农业生产的热量条件增加，有利于春玉米生长，但由于西北地区植被稀少，同时蒸发也在加剧[42]。此外，人类活动对农业水土资源配置的影响主要是通过改变作物种植结构，灌溉方式，技术水平等因素实现。2002年以来，辽宁省通过大力推广节水抗旱新品种等，农业管理水平得到提高，使玉米得到增产[43]。未来辽宁省玉米种植结构调整应立足各地区农业水土资源匹配特征，因地制宜，推广水土资源匹配状况良好地区



(a)1985—1996年

(b)1997—2004年

(c)2005—2018年

图5　辽宁省春玉米生产水足迹空间变化特征(单位:m³/hm²)

的先进经验，构建水土资源空间均衡的农业生产体系。

整体而言，辽宁省春玉米农业水土资源匹配状况逐渐转好，东北部农业水土资源匹配状况较好，西北部及瓦房店以南地区农业水土资源匹配状况较低。主要与辽宁东部地区降水量丰富，受海洋气候的影响，气候湿润，水足迹高，春玉米播种面积较西部和中部面积小有关；辽宁省西北部因受海洋性气候影响小，同时西北地区植被少，随气候变暖辽西北地区气温升高，蒸发加大，干旱事件增多[40]，农业水土资源匹配状况较低。随着辽宁省农业管理水平得到提高，玉米产量不断上升[44]，农业水土资源匹配水平得到提升。

当前将水足迹理论引入农业水土资源匹配的研究较少，然而以作物实际生长过程的水足迹测算农业水土资源匹配状况更切合实际[32]。本研究从水足迹视角，采用广义农业水土资源匹配系数，针对辽宁省春玉米生育期农业水土资源配置进行了多维度研究，克服以往单一农业水土资源研究不够全面的弊端，重点探究单一作物生长季的水土资源配置状况，有利于促进辽宁省农业用水资源利用效率提高，为精准农业发展提供一定的理论支撑和参考。但本文仍存在一些不足，在水足迹计算方面，文章仅考虑玉米生育期水足迹状况，并没有将其他作物列入其中，未来应对水足迹进行全面测算；在研究区域选取上，仅从辽宁省层面考虑，未拓展至全国层面或市县级层面研究，未来关于综合考量农业水土资源匹配等问题有待进一步深入。

5　结论

(1)从时间上看，1985—2018年间辽宁省春玉米农业水土资源匹配系数变化波动明显，总体以14 m³/(hm²·a)增长，年平均农业水土资源匹配系数值为5733 m³/hm²。由于降水量时空分布和种植结

构变化等社会因素的影响，导致不同时期农业水土资源匹配系数发生变化，1985—1996年低于研究时段平均值为5454 m^3/hm^2，1997—2004年均值为6162 m^3/hm^2，2005—2018年均值为5727 m^3/hm^2。

(2)从空间上看，“蓝绿水”视角下，1985—1996年辽宁省19个站点地区农业水土资源匹配系数平均值为5024 m^3/hm^2，其中低于平均值的站点有8个，分别为彰武、开原、朝阳、叶柏寿、绥中、瓦房店、大连、丹东；1997—2004年农业水土资源匹配系数平均值为4571 m^3/hm^2；2005—2018年农业水土资源匹配系数平均值为5837 m^3/hm^2。总体而言，东部地区农业水土资源匹配度良好的地区增多，西北部农业水土资源匹配较差的范围缩小。辽西地区在仅考虑“绿水”与加上“蓝水”后的水土资源匹配程度存在差异，春玉米生长期需水量的人为调配作用明显。

(3)从空间匹配格局变化看，1985—2018年间辽宁省春玉米农业水土资源匹配状况呈现变好的趋势，东北部地区农业水土资源匹配状况较好，西北部及瓦房店以南地区农业水土资源配置较低。1985—1996年农业水土资源较高地区主要是鞍山和营口两地，大连地区农业水土资源匹配最低；1997—2004年辽宁省春玉米农业水土资源匹配度整体较上个阶段明显降低；2005—2018年在这个阶段农业水土资源能够匹配状况整体明显增高，呈西北-东南条状分布。

参 考 文 献：

[1] 文倩，李小弯，郧雨旱，等 . 河南省农业水土资源承载力的时空分异[J]. 中国水土保持科学，2019，17(3)：104-112 .

[2] YU Y，LI Y M，CHEN X，et al . Climate change，water resources and sustainable development in the arid and semi-arid lands of Central Asia in the past 30 years[J]. Journal of Arid Land，2019，11(1)：1-14 .

[3] KARTHE D，CHALOV S，BORCHARDT D . Water resources and their management in central Asia in the early twenty first century：Status challenges and future prospects[J]. Environment Earth Science，2015，73(2)：487-499 .

[4] MENDELSOHN R，NORDHAUS W，SHAW D . The impact of global warming on agriculture：a ricardian analysis[J]. American Economic Review，1994，84：753-771 .

[5] SEO S，MENDELSOHN R . Measuring impacts and adaptations to climate change：A structural Ricardian model of African livestock management[J]. Agricultural Economics，2008，38：151-165 .

[6] WANG J，MENDELSOHN R，DINAR A，et al . The impact of climate change on China's agriculture[J]. Agricultural Economics，2009，40：323-337 .

[7] T Y C . A comparison of chance-constrained DEA and stochastic frontier analysis：bank efficiency in Taiwan[J]. Journal of the Operational Research Society，2002，53(5)：492-500 .

[8] SINUANY-STERN Z，FRIEDMAN L . DEA and the discriminant analysis of ratios for ranking units[J]. European Journal of Operational Research，1998，111(3)：470-478 .

[9] 黄克威，袁鹏，刘刚 . 基于DEA的四川省水土资源匹配研究[J]. 中国农村水利水电，2015(10)：58-65 .

[10] 任守德，付强，王凯 . 基于宏微观尺度的三江平原区域农业水土资源承载力[J]. 农业水土工程，2011，27(2)：8-14 .

[11] 王秋梅 . 三江平原水土资源优化配置研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2009 .

[12] 王亚迪，左其亭，刘欢，等 . 河南省水土资源匹配特征及均衡性分析[J]. 人民黄河，2018，40(4)：55-59，64 .

[13] 刘欢，左其亭 . 基于洛伦茨曲线和基尼系数的郑州市用水结构分析[J]. 资源科学，2014，36(10)：2012-2019 .

[14] SHEN Y，ZHANG Y，SCANLON B R，et al . Energy water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain[J]. Agricultural & Forest Meteorology，2013，181(4)：133-142 .

[15] ERIK NELSON，HEATHER SANDER，PETER HAWTHORNE，et al . Projecting global land-use change and its effect on ecosystem service provision and biodiversity with simple models[J]. Plos One，2010，5(12)：e14327 .

[16] 侯薇，刘小学，魏晓妹 . 陕西关中地区农业水土资源时空匹配格局研究[J]. 水土保持究，2012，19(1)：

134-138 .
[17] 耿庆玲 . 西北旱区农业水土资源利用分区及匹配特征研究[D] . 北京：中国科学院研究生院，2014 .
[18] 姜秋香，付强，王子龙，等 . 三江平原水土资源空间匹配格局[J] . 自然资源学报，2011，26(2)：270-277 .
[19] 聂晓，刘兴土，王毅勇 . 松嫩-三江平原地区农业水土资源匹配格局研究[J] . 湖北农业科学，2016，55(18)：4894-4897 .
[20] FALKENMARK M . Land-Water Linkages：A Synopsis Land and Water Integration and River Basin Management[R] . Rome：Food and Agriculture Organization of the United Nations，1995 .
[21] ALLAN J . Virtual water：A strategic resource global solutions to regional deficits[J] . Ground Water，1998，36：545-546 .
[22] HOEKSTRA A . Water scarcity in the Zambezi basin in the long-term future：A risk assessment[J] . Integrated Assessment，2003，4(3)：185-204 .
[23] 李保国，黄峰 . 1998-2007年中国农业用水分析[J] . 水科学进展，2010，12(4)：575-583 .
[24] 黄峰，李保国 . 中国广义农业水资源和水土资源匹配[C]//中国水利学会水资源专业委员会 . 变化环境下的水资源响应与持续利用，2009 .
[25] 杨双 . 辽宁省玉米省产情况及产业结构调整趋势[J] . 农业开发与装备，2018(5)：6-7 .
[26] 李胜贤，曹敏建 . 辽宁省粮食综合生产能力及安全预警模型研究[D] . 沈阳：沈阳农业大学，2015 .
[27] 袁东敏，郭建平 . 气候变化对东北玉米生长发育的影响评估[D] . 北京：中国气象科学研究院，2010 .
[28] 杨若子，周广胜 . 东北三省主要农业气象灾害综合危险性评价[J] . 气象学报，2015，3(6)：1114-1153 .
[29] 辽宁省水利电力厅 . 辽宁省抗旱资料汇编[R] . 沈阳：辽宁省水利厅，1992 .
[30] 王翠玲，宁方贵，张继权，等 . 辽西北玉米不同生长阶段干旱灾害风险阈值的确定[J] . 灾害学，2011，26(1)：43-47 .
[31] 靳春香 . 近50年辽宁省玉米全生育期有效降水与需水量变化特征研究[D] . 北京：北京林业大学，2015 .
[32] 秦娅青 . 水足迹视角下河南省农业水土资源匹配研究[D] . 焦作：河南理工大学，2019 .
[33] 樊慧丽，付文阁 . 水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长——以长江经济带为例[J] . 中国农业资源与区划，2020，41(10)：193-203 .
[34] 栾福超，张郁，葛晋 . 水足迹视角下三江平原地区农业水土资源空间配置格局研究[J] . 中国农学通报，2018，34(24)：88-94 .
[35] 刘彦随，甘红，张富刚 . 中国东北地区农业水土资源匹配格局[J] . 地理学报，2006(8)：847-854 .
[36] 李保国，黄峰 . 蓝水和绿水视角下划定“中国农业用水红线”探索[J] . 中国农业科学，2015，48(17)：3493-3503 .
[37] 汤国安，杨昕 . 地理信息系统空间分析实验教程[M] . 北京：科学出版社，2012 .
[38] 靳国栋，刘衍聪，牛文杰 . 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J] . 长春工业大学学报(自然科学版)，2003(3)：53-57 .
[39] 曹永强，李维佳，赵博雅 . 气候变化背景下辽西北春玉米生育期需水量研究[J] . 资源科学，2018，40(1)：150-160 .
[40] 王学凤，路洁，曹永强 . 辽宁省近54年旱涝特征分析及其对大气环流响应研究[J] . 水利学报，2020，51(12)：1514-1524 .
[41] 张学君，马苗苗，苏志诚，等 . 基于卫星降雨的辽宁省气象干旱实时监测研究[J] . 中国水利水电科学研究院学报，2020，18(1)：40-47 .
[42] 张艺萌，张雪松，郭婷婷，等 . 辽西北地区气温和降水变化对气候生产潜力的影响[J] . 中国农业气象，2015，36(2)：203-211 .
[43] 冯兴兴，王学凤，阳辉，等 . 辽宁省春玉米生产水足迹的时空变化研究[J] . 中国水利水电科学研究院学报，2020，18(6)：447-454 .
[44] 闫立萍，王志丹，赖晓璐 . 辽宁省粮食生产能力分析[J] . 江苏农业科学，2014，42(1)：415-416 .

Matching characteristics of agricultural soil and water resources in Liaoning province based on spring corn water footprint

CAO Yongqiang, ZHANAG Ruoning, FENG Xingxing

(*School of Geographical Sciences*, *Liaoning Normal University*, *Dalian* 116029, *China*)

Abstract: With the warming of climate and the adjustment of planting structure, the allocation of agricultural soil and water resources has also changed, and it is of great significance to study the matching characteristics of agricultural soil and water resources for the sustainable development of agriculture. Based on the perspective of crop production water footprint, the characteristics of soil and water resources matching in spring maize growing period of Liaoning Province from 1985 to 2018 were analyzed by using the calculation method of generalized agricultural soil and water resources matching coefficient. The results show that: the variation of soil and water resources matching coefficient of spring maize in Liaoning Province from 1985 to 2018 fluctuats obviously, with an increase of 14.18 $m^3/hm^2 \cdot a^{-1}$, and the average annual agricultural soil and water resources matching coefficient is 5733.08 m^3/hm^2. From the change of spatial matching pattern, the matching situation of spring maize agricultural soil and water resources in Liaoning Province shows a better trend between 1985 and 2018, and the areas with good matching of agricultural soil and water resources in the eastern region increase, and the range of poor matching of agricultural soil and water resources in the northwest decreases. In the future, the adjustment of maize planting structure in Liaoning Province should be based on the matching characteristics ofagricultural soil and water resources in various regions, and construct a balanced agricultural production system of soil and water resources in space.

Keywords: matching of agricultural soil and water resources; water footprint; temporal and spatial variation; plantation structure; Liaoning province

（责任编辑：王学凤）

期刊订阅信息

《中国水利水电科学研究院学报(中英文)》为水利部主管、中国水利水电科学研究院主办的综合性学术刊物。于2003年创刊，主要刊登水利水电宏观决策研究、应用基础研究及工程应用方面的科技论文、专题综述和工程技术总结等，开展学术讨论，介绍国内外科技动态。

办刊方针和任务：介绍中国水利水电科学研究院科研成果、动向，增进学术交流，加速成果转化。读者对象为国内外从事水利水电工程科研、规划、设计、建设、咨询、管理等工作的专业技术人员及高等院校相关专业的师生。

专业范围：水文、水资源、防洪减灾、水利信息及遥感技术、水环境保护、农田水利与节水、牧区水利、泥沙与水土保持、水力学、水工结构及材料、工程基础、岩土工程、工程抗震、水力机电、电站自动化、冷却水工程、河口海岸工程、施工与监理、水利经济、水利史研究等。

《中国水利水电科学研究院学报(中英文)》为双月刊，每奇数月末出版，大16开，每册80页，定价10元。

本刊国内外公开发行，国内邮发代号：82-54；国外邮发代号：Q8044。

地 址：北京市玉渊潭南路3号中国水科院D座303室

邮 编：100038

电 话：010-68786649；010-68786238；010-68785677

E-mail：journal@iwhr.com

投稿网址：http://journal.iwhr.com

《中国水利水电科学研究院学报(中英文)》编辑部