

2005—2017 年焉耆盆地平原区地下水时空演变规律及其与土地利用的关系

章文亭^{1,2}, 杨鹏年^{1,2}, 彭亮^{1,2},
王环波^{1,2}, 周龙^{1,2}, 李晴^{1,2}, 玉素甫江·如素力³

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与
水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: [目的] 分析 2005—2017 年焉耆盆地平原区土地利用变化与地下水总溶解固体物 TDS 之间的关系, 为地下水可持续利用和生态环境发展提供依据。[方法] 利用 GIS 软件对焉耆盆地平原区 2005, 2014, 2017 年的 Landsat-TM/ETM 和 Landsat 8 的 CNLUCC 数据进行重分类, 将土地分为耕地、林地、草地、水域、城镇建设用地和未利用土地 6 大类; 通过对 232 组地下水水样的采集和分析, 借助地统计和叠加分析模块研究焉耆盆地的 TDS 时空分区特征。[结果] 焉耆盆地平原区以耕地、水域和未利用土地为主, 占总面积的 60% 以上; 2014 年耕地 TDS 均值的含量最高为 708.6 mg/L, 林地 TDS 均值的含量最低为 680.4 mg/L; 2017 年城镇建设用地 TDS 均值的含量最高为 521.6 mg/L, 未利用土地 TDS 均值的含量最低为 477.4 mg/L。[结论] 2017 年各土地利用类型的 TDS 均值含量都低于 2014 年, 是源于水域面积增加导致地下水补给量增加, 耕地扩张的速度减缓及地下水径流积极循环带的淡化作用。

关键词: 焉耆盆地; 土地利用变化; GIS; 叠加分析; TDS 含量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0276-08

中图分类号: X523, F301

文献参数: 章文亭, 杨鹏年, 彭亮, 等. 2005—2017 年焉耆盆地平原区地下水时空演变规律及其与土地利用的关系[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 276-283. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.038; Zhang Wenting, Yang Pengnian, Peng Liang, et al. Spatiotemporal evolution of groundwater and its relationship with land use in plain area of Yanqi Basin during 2005—2017 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 276-283.

Spatiotemporal Evolution of Groundwater and Its Relationship with Land Use in Plain Area of Yanqi Basin During 2005—2017

Zhang Wenting^{1,2}, Yang Pengnian^{1,2}, Peng Liang^{1,2},
Wang Huanbo^{1,2}, Zhou Long^{1,2}, Li Qing^{1,2}, Yusufujiang · Rusuli³

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3. Institute of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] The relationship between land use change and groundwater total dissolved solids (TDS) in the Yanqi Basin plain from 2005 to 2017 was analyzed to provide a basis for the sustainable use of groundwater and ecological environment development. [Methods] Geographic information system software was used to reclassify the CNLUCC data of Landsat-TM/ETM and Landsat 8 in the Yanqi Basin plain area in 2005, 2014, and 2017. The land was divided into six categories: cultivated land, forest land, grassland, water area, urban construction land, and unused land. A total of 232 sets of groundwater samples collected

收稿日期: 2020-09-26

修回日期: 2020-11-10

资助项目: 2020 年新疆自然科学基金项目“基于多源数据的规模化节水灌区定量分析水盐时空分异特征”(2020D01A54); 国家自然科学基金项目 NSFC-新疆联合基金“变化环境下干旱区湖泊流域水—生态—经济复合”(U1703341)

第一作者: 章文亭(1997—), 女(汉族), 江西省九江市人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区地下水及水文水资源。Email: m15871666536@163.com。

通讯作者: 杨鹏年(1966—), 男(汉族), 新疆维吾尔族乌鲁木齐市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区地下水资源利用研究。Email: ypn10@163.com。

from the Yanqi Basin were analyzed, and geostatistical methods and overlay analysis modules were used to study the characteristics and spatial distribution of total groundwater dissolved in the study area. [Results] The plain area of the Yanqi Basin was dominated by cultivated land, water, and unused land, accounting for more than 60% of the total area. In 2014, the highest average TDS content of cultivated land was 708.6 mg/L, and the lowest average TDS content of woodland was 680.4 mg/L. In 2017, the highest average TDS content of urban construction land was 521.6 mg/L, and the lowest average TDS content of unused land was 477.4 mg/L. [Conclusion] The average TDS content of each land use type in 2017 was lower than that in 2014, which is because the increase in water area that led to an increase in groundwater replenishment, a slowdown in the expansion of cultivated land, and the desalination of groundwater runoff active circulation zones.

Keywords: Yanqi Basin; land use change; geographic information system (GIS); overlay analysis; total dissolved solids content

焉耆盆地是新疆重要的绿洲区,但生态环境较为脆弱,其发展依赖于地下水资源。近年来,随着地下水利用量的加大,改变了湖区区域水流系统,造成不同水流系统交汇区域的水质发生改变,间接制约生态环境与社会经济发展^[1]。地下水矿化度对其所在地区的环境有一定的指示作用,可以反映当地的土地利用类型变化状况,土地利用的变化表征人地关系在时空变化中的模式和强度,对于规划地下水开采量都有重要意义^[2]。

研究土地利用变化情况与 TDS 含量的关系,可以为焉耆盆地内地下水资源可持续利用和生态环境等方面提供有力的依据。随着社会进步及农村城镇一体化建设步伐加快,农田扩张和城市变化使得土地利用呈现多样化^[3]。研究地下水矿化度的时空分布规律对于受人类活动影响,生态环境脆弱的内陆干旱区有重要的意义^[4]。土地利用与水质有直接或间接的关系。方娜等^[5]以鄱阳湖为例,发现居民用地与所有参数呈正相关,耕地与 TN, TP 呈正相关。吕志强等^[6],研究山地城市河流发现土地利用结构对各水质指标有影响,建设用地和农业用地对河流水质恶化具有明显作用。徐启渝等^[7],研究赣江支流发现居民建设用地是对水质影响最显著单一土地利用类型,林地、居民用地、农田是对水质影响最显著的土地利用组合。Christian 等^[8]研究土地利用与城市水源污染间的关系,发现向非正式定居对支流内的微生物和物理化学质量有负面的影响。Prita 等^[9]基于 2010—2014 年的水质和遥感数据,研究不同土地利用类型对西里翁河流域水质的影响,发现城市用地比例与氨氮浓度呈强正相关。综上所述,目前国内已有研究主要集中在平原区或南方地区关于干旱区的研究较少,大多是研究湖泊或者流域的水质变化情况与土地景观格局间的关联性。关于焉耆盆地等西部干旱区的水质与土地利用间的相关性研究较少。近年来由于人类活动因素的影响造成土地利用格局发生变化,地

下水 TDS 空间分布差异性大。因此掌握研究区地下水 TDS 变化趋势和土地利用类型面积变化情况是分析各土地利用类型地下水 TDS 含量的分布的重要前提。

本文结合 RS 与 GIS 技术,分析土地利用类型和变化趋势的信息^[10],并选取地下水 TDS 为研究对象,将其分布状况与土地利用类型的关系进行探讨,以期做好对焉耆盆地的治理和保护,为地下水的利用提供依据^[11]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆巴音郭楞蒙古自治州境内,总面积 13 612 km²,其平原区为 6 501.47 km²,位于东经 85°55′—87°26′,北纬 41°40′—42°25′。包括和静县、焉耆县、和硕县、博湖县等县市和新疆生产建设兵团第 2 师 21 团等 8 个团场,区内拥有中国最大的淡水湖博斯腾湖,是特色的农业种植基地。研究区地势四周向盆地倾斜^[12],且从周边山脉向博斯腾湖倾斜,坡度由陡变缓,北部高南部低,岩性颗粒由粗变细。主要分为丘陵、冲洪积平原和三角洲平原及湿地^[13]。

焉耆盆地属于温带大陆性干旱半干旱气候,多年平均气温在 5.85 ℃,降雨集中在夏季。盆地的气候特征为热量足,日照时间长、昼夜温差大,空气较湿润,平均降雨量为 50~70 mm,降水差异性大,山区降水大于平原区,年蒸发量达到 2 000~2 500 mm^[14]。焉耆盆地有大小十余条河流,主要的有开都河、乌拉斯台河、清水河等,也为博斯腾湖主要的水源^[15-16]。地表径流形成于山区且分布不均,为地下水的储存提供了良好的条件,也是适宜种植的区域^[17]。焉耆盆地主要为第四纪岩性结构,土壤以砂砾、粗砂、细沙、壤土、亚黏土为主,细土平原区受河流、湖泊和侧向径流的影响,埋深在 5 m 左右。其下覆地层为相对隔水的地质边界,总体有来自基岩裂隙水的补给,局部

有河流和山区的侧向补给以及降水入渗和田间灌溉渗漏量等的补给^[4]。其排泄主要是潜水蒸发、排碱渠、径流排泄和人工开采^[17]。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 LUCS 数据的获取 LUCS 数据来自中国科学院资源环境科学数据中心和欧空局 ESA CCI land cover and website 网站, 下载 2005, 2014, 2017 年 3 期的 30 m × 30 m 分辨率的土地利用数据。根据其土地资源及其利用属性, 分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地, 解译则是采用人机交互式目视判读的方式构建并在解译完成后开展精度检验以确保数据的准确性^[18-19]。

1.2.2 地下水矿化度数据的获取 本研究在焉耆盆地平原区四县内的乃门莫敦、五号渠乡、清水河、解放渠等地进行取样, 2005 年 4 月共收集 64 个样本, 2014 年 4 月共采集 97 个样本, 2017 年 4 月共采集 71 个样本, 共计 232 个样本。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用转移矩阵 在焉耆盆地内每种土地利用类型间会有不同程度的转化。通过转移矩阵可以计算土地利用类型相互转化的具体的量值、转移情况和转移种类, 用 GIS 中的空间分析对土地利用的图进行叠加, 计算土地利用类型转移矩阵, 得到 2005—2014, 2014—2017 年的土地利用转化关系。其表达式为:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: S 为面积 (km^2); S_{ij} 为研究初期第 i 类土地利用类型转移至研究末期第 j 类土地利用类型的面积 (km^2); n 为土地利用的类型数。

1.3.2 GIS 克里金插值 GIS 是一种基于计算机的综合数据库管理系统, 可以储存大量的数据及其属性,

用于捕捉、检索、处理和分析探索地理空间的数据^[20]。

其原理为: 设研究区域为 A 区域化变量为 $\{z(x) \in A\}$, x 表示空间位置, $Z(x)$ 在采样点 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 根据克里金插值原理, 待插点处的属性值 $Z(x_0)$ 插值结果是 n 个已知采样点属性值的加权和, 即:

$$(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

式中: $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为待求权系数; $Z(x_i)$ 为采样点。

1.3.3 基于 GIS 的空间叠加计算方法 通过一系列的叠加操作将两个数据进行空间上的对应, 从而产生新的数据, 根据 GIS 的数据类型和结构的差异, 将叠加分析分为基于矢量数据的叠加分析和基于栅格数量的叠加分析两种。本研究采用的是基于矢量数据的网格覆盖的叠加分析。用输入数据建立网格, 并给网格赋值再加入到叠加的数据上, 得出新的数据并进行分析。

2 结果与分析

2.1 典型年土地利用类型状况

由 2005, 2014, 2017 年研究区土地利用类型分布及地下水 TDS 含量权重结果(图 1, 表 1)可知其各类土地利用类型的面积及比例。研究区内耕地、水域和未利用土地占主要部分; 林地和草地面积逐年减少, 水域面积变化不大, 而耕地面积占焉耆盆地平原区总面积的 30%~40%, 且主要分布在北部、西部和西北部。林地从 2005 年的 213.61 km^2 锐减到 2014 年的 16.92 km^2 , 同时草地也是从占比 16.3% 下降到占比 12.8%, 而耕地从 1 893.6 km^2 直接增加到 2 410.5 km^2 , 这是由于大量开垦耕地导致林草地面积的减少。城镇建设用地从 2005—2014 年主要分布在开都河中下游、和静县的北部与和硕县的东北部, 到 2017 年扩展至开都河的中游地区和博湖县的绿洲区。

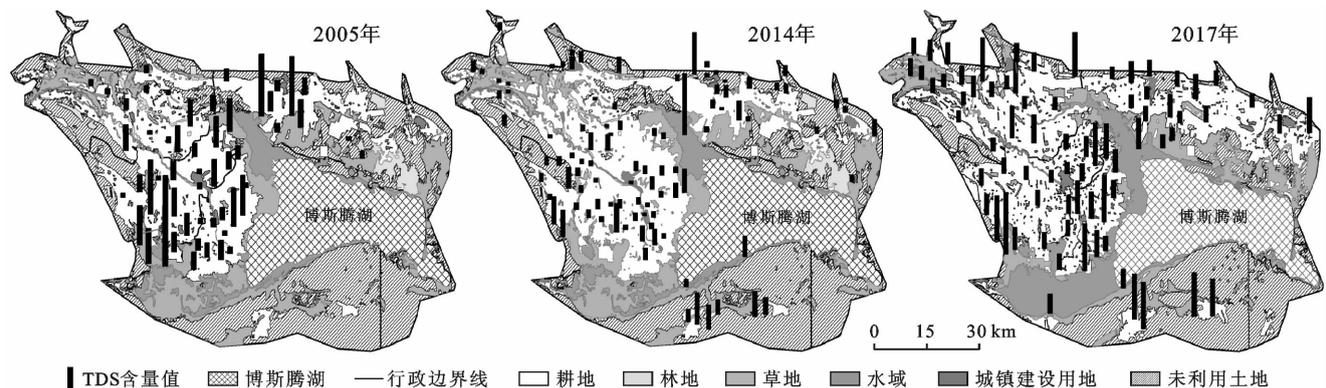


图 1 2005, 2014, 2017 年土地利用分布及地下水 TDS 含量权重

表 1 2005, 2014, 2017 年焉耆盆地各土地利用类型面积及其比例

土地利用类型	2005 年		2014 年		2017 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	1 893.6	29.10	2 410.5	37.10	2 410.1	37.10
林地	213.66	3.30	16.9	0.30	16.9	0.30
草地	1 058.9	16.30	829	12.80	825.1	12.70
城镇建设用地	103	1.60	155.8	2.40	179	2.80
水域	1 075.6	16.50	994.3	15.30	1 084	16.70
未利用土地	2 156.5	33.20	2 094.6	32.20	1 986	30.50

2.2 焉耆盆地土地利用转移矩阵

用 GIS 和 SPSS 统计数据^[21], 得到 2005—2014 年和 2014—2017 年的焉耆盆地土地利用转移矩阵, 分别见表 2—3。由 2005, 2014, 2017 年焉耆盆地各土地利用类型及其比例(表 1)可知, 2005—2014 年土地转移发生在各种土地类型之间。2005—2014 年主要发生转移的土地类型为耕地、未利用土地和草地。耕地有 82.6 km² 转化为草地, 有 36.7 km² 转化为未利用土地; 未利用土地有 356.8 km² 转化为耕地, 215.1 km² 转化为草地还有 156.85 km² 转化为城镇建设用地。草地有 230.8 km² 的土地向耕地转移, 371.4 km² 的土地向未利用土地转移。而 2014—2017 年土地利用仍

在耕地、未利用土地和草地间转化。其中, 草地主要是向水域转化, 耕地向城镇建设用地转移了 7.9 km², 向草地转移了 6.6 km², 向未利用土地转移了 6.5 km²; 未利用土地有 74.3 km² 向水域转化, 有 20.7 km² 向草地转化。耕地的面积在 2005—2014 年有大幅度增加, 2014—2017 年面积基本保持不变, 2005—2017 年耕地面积的增加主要是来自未利用土地、草地和林地的转化。林地减少了 146.7 km² 的面积, 是由于林地中 109.6 km² 的面积转化为耕地, 76.1 km² 的面积转化为草地。经济的发展影响人们逐渐开垦耕地, 从而村庄趋于城镇化, 城镇建设用地面积增加了 76 km²; 水域面积没有变化和转化的趋势。

表 2 2005—2014 年焉耆盆地土地利用面积转移矩阵

km²

土地利用类型	2014 年土地利用类型						总计
	草地	城镇建设用地	耕地	林地	水域	未利用土地	
2005 年 草地	422.0	4.8	82.6	76.3	28.1	215.1	828.9
城镇建设用地	11.7	42.0	32.3	11.3	1.6	56.9	329.3
耕地	230.7	49.1	1650.3	109.4	13.6	356.8	2 409.8
林地	5.0	1.1	5.3	3.9	0.0	1.7	16.9
水域	17.8	0.5	13.0	3.7	945.3	14.1	994.5
未利用土地	371.4	5.5	36.7	9.0	87.0	1 412.3	1 921.8
总计	1 058.7	103.0	1 820.0	213.6	1 075.6	2 047.7	6 501.5

表 3 2014—2017 年焉耆盆地土地利用面积转移矩阵

km²

土地利用类型	2017 年土地利用类型						总计
	草地	城镇建设用地	耕地	林地	水域	未利用土地	
2014 年 草地	795.2	1.1	6.6	0.3	1.1	20.7	824.9
城镇建设用地	1.0	164.7	7.9	0.0	0.1	5.3	179.0
耕地	6.0	9.3	2 387.2	0.4	1.6	5.6	2 409.8
林地	0.4	0.1	0.3	16.0	0.0	0.1	16.9
水域	17.8	0.1	1.4	0.0	990.3	74.3	1 083.9
未利用土地	8.5	154.0	6.5	0.2	1.5	1 816.3	1 986.9
总计	828.9	329.3	2 409.8	16.9	994.5	1 922.2	6 501.5

2.3 焉耆盆地地下水开采量变化趋势与 TDS 分级

根据巴州水资源公报中焉耆盆地 4 县内农林牧渔的地下水用水量的变化情况(图 2), 可以得出 2005—2017 年地下水开采量总体呈缓慢上升趋势,

但在 2016 年略有下降, 是由于 2016 年焉耆盆地受到退地减水和“三条红线”政策的影响, 各地对用水量和地下水的开采有严格的控制, 因此在 2016 年地下水开采量有所下降。

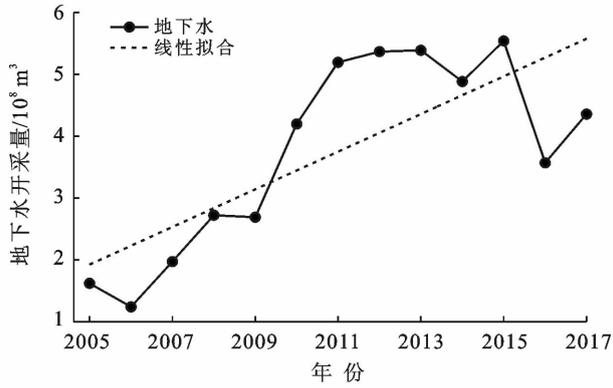


图 2 焉耆盆地地下水开采量趋势

如表 4 所示,根据《地下水质量标准 GB/T14848-2017》^[22]可知,2005 年采集的 64 个样本中,13 个属于Ⅲ类水平($500 \text{ mg/L} < \text{Ⅲ类} \leq 1\,000 \text{ mg/L}$),11 个属于Ⅳ类水平($1\,000 \text{ mg/L} < \text{Ⅳ类} \leq 2\,000 \text{ mg/L}$),40 个属于Ⅴ类水平($> 2\,000 \text{ mg/L}$)。2014 年采集的 97 个样本中,18 个属于Ⅰ类水平($\leq 300 \text{ mg/L}$),28 个属于Ⅱ类水平($300 \text{ mg/L} < \text{Ⅱ类} \leq 500 \text{ mg/L}$),31 个属于Ⅲ类水平,17 个属于Ⅳ类水平,3 个属于Ⅴ类水平,2017 年Ⅱ类和Ⅲ类占主要部分。2005 年Ⅴ类水占主要部分,为 62.5%;2014 年Ⅱ类和Ⅲ类占主要部分为 60.8%,2014 年Ⅳ类的比例比 2017 年多 4.5%,且有 3.0%为Ⅴ类水平。

表 4 2005,2014,2017 年焉耆盆地地下水 TDS 分级

TDS 分级	总溶解性固体/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	各级样本数			各级样本所占比例/%		
		2005 年	2014 年	2017 年	2005 年	2014 年	2017 年
I	≤ 300		18	4		18.60	5.60
II	$> 300 \sim 500$		28	35		28.90	49.30
III	$> 500 \sim 1\,000$	13	31	22	20.30	32.00	31.00
IV	$> 1\,000 \sim 2\,000$	11	17	10	17.20	17.50	14.10
V	$> 2\,000$	40	3		62.50	3.00	

2.4 焉耆盆地地下水 TDS 分布特征

根据 2005,2014,2017 年的 TDS 数据,利用 GIS 软件中的地统计模块中克里金插值得出研究区 TDS 含量分区结果(图 3),焉耆盆地平原区地下水是逐渐汇入最低点博斯腾湖。2005 年沿着开都河逐渐升高,在开都河的南岸矿化度含量为最大值。在包尔海乡处地下水 TDS 均值达到 $2\,000 \text{ mg/L}$,为Ⅴ类水的 TDS 含量;在黄水沟的南岸,北大渠乡处 TDS 值含量也在 $2\,000 \text{ mg/L}$,以及博斯腾湖的北部和东北部水质均为Ⅴ类水的 TDS 含量。在和硕县的中部和焉耆县的本布图乡处水质较好,TDS 均值在 500 mg/L 左右,为Ⅲ类水的 TDS。

2014 年地下水水质整体优于 2005 年,属于Ⅱ类

水的 TDS,最大的 TDS 含量在 $5\,000 \text{ mg/L}$ 左右。研究区 2005 年水质较差的区域在 2014 年虽得到改善,但就整体而言地下水水质劣于 2017 年,在博斯腾湖南部的博斯腾湖乡和闹音呼都克村处 TDS 含量在 $1\,000 \text{ mg/L}$ 以上。2017 年 TDS 含量较 2014 年呈下降趋势,表现在Ⅱ类水 TDS 的占比从 28.9%增加到 53.2%,Ⅲ类水的 TDS 的占比从 32.0%下降到 28.6%。从 2005,2014,2017 年地下水 TDS 分布可知,和静县的开都河北岸乌拉斯台处的 TDS 含量由 $< 300 \text{ mg/L}$ 增加到 500 mg/L ,可能是由于开垦耕地,导致地下水需水量增加,地下水位下降且含水层变薄,因此稀释盐的能力减弱而造成地下水的 TDS 增加。

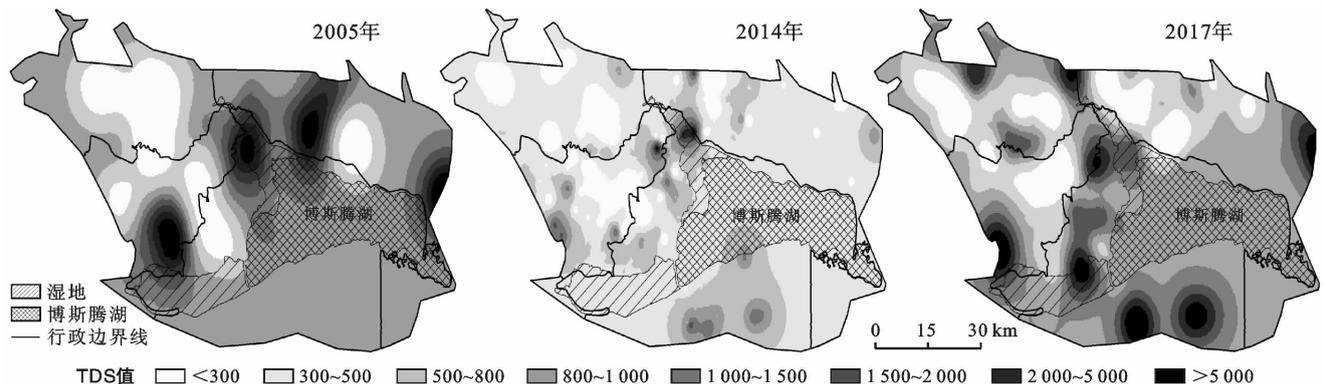


图 3 2005,2014,2017 年焉耆盆地地下水 TDS 分区

2.5 不同土地利用类型下 TDS 含量及分布状况

通过 GIS 中叠加分析模块,可以统计出不同 TDS 区间所累计的面积之和,见地下水 TDS 含量分区面积统计结果(表 5)。2005 年地下水 TDS 含量主要在 $>2\ 000\ \text{mg/L}$ 区间内,占总面积的 81.60%,2005—2014 年地下水 TDS 含量整体从 $>2\ 000\ \text{mg/L}$ 降至 $1\ 000\sim 2\ 000\ \text{mg/L}$,2014—2017 年,地下水

TDS 总体含量呈下降趋势。焉耆盆地平原区 TDS 含量在 $1\ 000\sim 2\ 000\ \text{mg/L}$ 和 $>2\ 000\ \text{mg/L}$ 的面积在减小,其他含量的 TDS 的面积都在增大。2014 年 TDS 含量在 $1\ 000\sim 2\ 000\ \text{mg/L}$ 的面积最大,为 $6\ 352.4\ \text{km}^2$,占总面积的 97.8%,而 2017 年 TDS 含量在 $300\sim 500\ \text{mg/L}$ 的面积最大,为 $4\ 473.2\ \text{km}^2$,占到总面积的 68.8%。

表 5 2005,2014,2017 年焉耆盆地地下水 TDS 含量分区面积统计结果

总溶解性固体/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2005 年		2014 年		2017 年	
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%
<300	0	0	1.8	0	55.9	0.90
$300\sim 500$	0	0	3.8	0.10	4473.2	68.80
$500\sim 1\ 000$	492.2	7.57	98.2	1.50	1\ 940.5	29.80
$1\ 000\sim 2\ 000$	703.6	10.82	6\ 352.4	97.80	31.9	0.50
$>2\ 000$	5\ 307.7	81.60	45.3	0.70	0	0.00
合计	6\ 501.5	100.00	6\ 501.5	100.00	6\ 501.5	100.00

根据上述分析的焉耆盆地地下水 TDS 的分布特征,结合土地利用类型的分布特点,来分析两者之间的关系。将地下水 TDS 含量图进行网格化,并对网格赋值,将数据转为矢量数据,对两者进行叠加,可以得出各土地利用类型的 TDS 含量对比结果(表 6)。从表格上可以看出 2005 年各个土地利用类型的 TDS 含量高于 2014 年,2014 年的 TDS 均值含量都高于 2017 年,说明从 2005—2014 年水质整体矿化度较高,从 2014—2017 年,焉耆盆地的水质整体良好,部分地区水质有淡化的趋势。2014 年 TDS 均值含量

最高的土地利用类型为耕地,达 $708.6\ \text{mg/L}$,最低的为林地,达 $680.4\ \text{mg/L}$ 。2017 年 TDS 均值含量最高的土地利用类型为城镇建设用地,达 $521.6\ \text{mg/L}$,最低的为未利用土地,达 $477.4\ \text{mg/L}$ 。且在每种土地利用类型上标出 TDS 的含量权重以便清晰的看出不同土地利用方式下地下水水质的差异。从图 1 可知,耕地的地下水 TDS 权重在 2005—2017 年都比较高,林地的地下水 TDS 权重较低;分布在清水河下游处和开都河南岸 7 个星附近的地下水 TDS 权重高于开都河上游与清水河下游乌什塔拉乡。

表 6 2005,2014,2017 年焉耆盆地各土地利用类型的 TDS 含量对比

年份	土地利用类型的 TDS 含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)					
	耕地	草地	林地	城镇建设用地	水域	未利用土地
2005	1\ 446.3	1\ 531	1\ 210.8	1\ 286.3	1\ 548.3	1\ 459.4
2014	708.6	693.1	680.4	703.8	682.8	698.8
2017	491	504.7	499.7	521.6	499.2	477.4

3 讨论

3.1 土地利用分布和转移的趋势

土地利用的变化与农业规模、人口增长、社会发展等因素有关^[23]。2005—2017 年,由于城镇化的进程加快,人们开始发展农业并种植经济作物从而耕地面积在 2005—2014 年增加了 $516.9\ \text{km}^2$,同时这几年来随着采伐、农业用地和建设用地的扩张使得林草地的面积由占比 3.3%和 16.3%下降到占比 0.3%和 12.8%。2014 年后人们有意识保护环境逐渐减少开垦林草地,故耕地和林草地的面积没有较大的变化^[24]。水域和未利用土地的面积变化趋势不大,城镇建设用地的面积在 2005—2014 年增幅为 0.8%,在

2014—2017 年其面积持续增加到 $179.0\ \text{km}^2$ 。在 2005—2014 年里,有 $374.1\ \text{km}^2$ 的草地转化为未利用土地,主要是由于焉耆盆地的暖干气候影响^[25],加之人类活动的增强,使得草地逐渐向荒漠化发展从而转化为未利用土地。2014—2017 年焉耆盆地的荒漠化与绿洲化在时间和空间上互存和互转。由于自然和人为因素等原因,耕地与林草地互相转化,同时耕地上有农业的灌溉与排碱,严重时会导致土地盐碱化从而无法进行种植沦为未利用土地^[24],参照 CJ/T340-2016《绿化种植土壤》^[26]中满足正常种植的土壤 EC 含量在 $0.15\sim 0.9\ \text{ms/cm}$,根据之前采集的土样数据发现近年来焉耆盆地内部分土壤的 EC 值已达到 $10\ \text{ms/cm}$,不能作为常规耕地正常使用,导致

耕地转化为未利用土地,可见草地—耕地—未利用土地三者的互传趋势较为明显^[25]。

3.2 地下水 TDS 的变化趋势

地下水质量类别按照 TDS 的含量分为 I—V 类,2005 年主要为 V 类,2014 年和 2017 年焉耆盆地主要为 II 类和 III 类水。由于焉耆盆地地势东高西低,而焉耆县的西南处正好位于开都河下游,接受来自地表和地下水的补给。由于焉耆盆地地势东高西低,而焉耆县的西南处正好位于开都河下游,接受来自地表和地下水的补给。开都河和孔雀河下游有来自上游的侧向补给、河道渗漏、田间渗漏和渠系的补给^[27],因此排泄较弱从而盐分会在此处累积导致水中的含盐量较高^[28],导致 TDS 含量大。焉耆县的北大渠乡的 TDS 含量从 2014 年的 1 500~2 000 mg/L 下降到 800~1 000 mg/L,是由于此处深层循环积极带上,地下水循环迅速且不断接受来自清水河的补给,所以 TDS 降低。博湖县的西北部矿化度逐渐下降是由于地下水开采量的增加在加速地下水循环的同时也有来自开都河的补给且各地逐渐开始实施退耕还林的政策,所以化肥等农业能源的投入逐渐减少,导致矿化度下降^[23]。从 2014—2017 年研究区内地下水开采量持续上升,由于使用承压水而非地表水进行农业灌溉,所以带入耕地和下渗到地下水的盐分较少,地下水矿化度的含量逐渐降低,且水域面积逐年增大,地下水补给也在增强,地下水开采量增大造成地下水流系统循环快,更替频繁导致水质淡化^[29]。

3.3 土地利用与地下水 TDS 的相关性

2014 年 TDS 含量在 1 000~1 500 mg/L 中面积最大,为 5 451.9 km²,占总面积的 83.9%,大部分属于灌区,说明 TDS 含量总体高是源于人类农业活动的影响,地下水排泄减弱土壤盐分增高渗入地下水中,产生高矿化度含量的地下水。而 2017 年 TDS 含量在 300~500 mg/L 中面积最大,占比为 68.8%。且大部分为未利用土地,说明未利用土地因为荒漠化的影响,所以人类活动减少从而人工排泄降低,盐分积累在表层土壤并未渗透到深层地下水中。将 6 种类型的土地面积变化量与均值 TDS 的含量进行 Spearman 秩相关性分析,结果表明土地利用面积与存在显著正相关($R^2=0.7, p<0.05$),从各土地利用类型 TDS 含量均值表中得出耕地的 TDS 含量是所有土地利用类型中较高的,因为农田在施肥时会促进地下水盐分的积累造成耕地的地下水 TDS 增加^[30]。林地的地下水 TDS 含量自 2005—2017 年在所有土地利用类型中始终最低,因为林地主要分布在乌拉斯台河的附近接受来自河水的补给且林地基本未与其他的土地类型发生转化。

4 结论

(1) 2005—2017 年焉耆盆地土地利用类型以耕地、未利用土地、水域为主,占总面积的 60% 以上。草地主要转化为未利用土地,其次是耕地。城镇建设用地有 49.25 km² 转化为耕地,耕地与未利用土地、草地相互转化。林地的流出率为 48.7%,流入率为 78.3%,水域面积整体变化不大。

(2) 2017 年各土地类型均值地下水 TDS 含量为 495.6 mg/L 低于 2014 年的 695.4 mg/L。这是由于水域面积增加导致地下水补给量增加、耕地的扩张速度减缓,部分区域位于河流下游或河流附近的地下水积极循环导致水质淡化。

(3) 2014 年和 2017 年耕地和城镇建设用地的地下水 TDS 含量最高,林地和未利用土地的 TDS 最低。焉耆盆地平原区内耕地和城镇建设用地面积的增加与地下水 TDS 含量最高对应,林地和未利用土地面积的减少与地下水 TDS 含量最少呈对应关系。

[参 考 文 献]

- [1] 景宇鹏,连海飞,李跃进,等.河套盐碱地不同利用方式土壤盐碱化特征差异分析[J].水土保持学报,2020,34(4):354-363.
- [2] 彭李晖,刘延锋,杨霄翼.焉耆盆地开都河北岸潜水水化学演化规律[J].地质科技情报,2013,32(6):123-129.
- [3] Lei Chaogui, Wagner P D, Fohrer N. Identifying the most important spatially distributed variables for explaining land use patterns in a rural lowland catchment in Germany[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(11): 1788-1806.
- [4] 赵江涛,周金龙,高业新,等.新疆焉耆盆地平原区地下水溶解性总固体时空演化[J].农业工程学报,2016,32(05):120-125.
- [5] 方娜,刘玲玲,游清徽,等.不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J].环境科学,2019,40(12):5348-5357.
- [6] 吕志强,庆旭瑶,任玉芬,等.山地城市河流土地利用结构对水质的影响:以重庆市为例[J].湖泊科学,2016,28(2):319-327.
- [7] 徐启渝,王鹏,王涛,等.土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响[J].湖泊科学,2020,32(4):1008-1019.
- [8] Van der Hoven C, Ubomba-Jaswa E, Van der Merwe B, et al. The impact of various land uses on the microbial and physicochemical quality of surface water bodies in developing countries: Prioritisation of water resources management areas[J]. Environmental nanotechnology, monitoring & management, 2017,8:280-289.
- [9] Permatasari P A, Setiawan Y, Khairiah R N, et al. The effect of land use change on water quality: A case study

- in Ciliwung Watershed [C] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2017, 54(1): 012026.
- [10] 费兵强, 韩炜, 马霄华, 等. 2010—2015 年焉耆盆地 LUCC 特征分析及预测[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(3): 395-404.
- [11] 王娟, 张飞, 张月, 等. 艾比湖区域水质空间分布特征及其与土地利用/覆被类型的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 7971-7980.
- [12] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 米热古丽·艾尼瓦尔, 麦尔丹·阿不拉, 等. 新疆焉耆盆地地下水地球化学特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 263-268.
- [13] 艾克热木·热合曼. 焉耆盆地主要分水枢纽工程对植被覆盖变化的影响[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2020.
- [14] 李建涛. 焉耆盆地绿洲气候对土地利用变化的响应[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
- [15] 崔宏. 干旱区绿洲水环境与土地利用/覆盖变化响应关系研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2017.
- [16] 汪昌树. 焉耆盆地绿洲区水体硝态氮量演变特征与趋势研究[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [17] 秦国强. “三条红线”制度控制下焉耆盆地灌溉农业可持续发展研究[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
- [18] Liu Jiyuan, Liu mingliang, Tian Hanqin, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 442-456.
- [19] Liu Jiyuan, Liu mingliang, Deng Xiangzheng, et al. The land use and land cover change database and its relative studies in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2002, 12(3): 275-282.
- [20] 李敬洋, 王震, 陈怡, 等. 基于 BP-GIS 的京津冀碳钢土壤腐蚀速率地图研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1151-1158.
- [21] 张洁, 焦树林, 赵宗权, 等. 基于 GIS 的百花湖流域土地利用变化与水质响应[J]. 环境监测管理与技术, 2020, 32(3): 14-18.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14848-2017 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 段峥嵘, 祖拜代·木依布拉, 夏建新, 等. 近 25 年阿克苏绿洲土地利用时空变化及其驱动力分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 413-426.
- [24] 张德镗, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2865-2875.
- [25] 哈丽旦·司地克, 玉素甫江·如素力, 海米提·依米提. 新疆焉耆盆地人类活动与气候变化的效应机制[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5750-5758.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJ/T 340-2016 绿化种植土壤[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [27] 李艳菊, 丁建丽, 米热古力·艾尼瓦尔. 渭一库绿洲土壤剖面盐分分布特征及驱动因子分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 58-65.
- [28] 代述勇, 雷加强, 赵景峰, 等. 塔里木盆地南缘策勒绿洲区地下水 TDS 空间变异及水化学特征分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 722-729.
- [29] 李彬, 史海滨, 张建国, 等. 节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 99-110.
- [30] 刘旭艳, 张心昱, 袁国富, 等. 近 10 年中国典型农田生态系统水体 pH 和矿化度变化特征[J]. 环境化学, 2019, 38(6): 1214-1222.

(上接第 259 页)

- [20] 程艳妹, 任彩凤, 郑欣, 等. 淮南市三维生态足迹及其驱动因子研究[J]. 生态科学, 2018, 37(6): 106-113.
- [21] 董建红, 张志斌, 张文斌. 基于三维生态足迹的甘肃省自然资本利用动态变化及驱动力[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 3075-3085.
- [22] Wang Mingquan, Liu Jingshuang, Wang Jinda, et al. Ecological footprint and major driving forces in West Jilin Province, Northeast China [J]. Chinese Geographical Science, 2010, 20(5): 434-441.
- [23] Yang Yi, Ling Sun, Zhang Ting, et al. Three-dimensional ecological footprint assessment for ecologically sensitive areas: A case study of the Southern Qinling piedmont in Shaanxi, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 540-553.
- [24] 马明德, 马学娟, 谢应忠, 等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 682-689.
- [25] 杨春华, 杨玲. 偏最小二乘建模及其多重共线抑制能力分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 523-526.
- [26] 谢鸿宇, 叶慧珊. 中国主要农产品全球平均产量的更新计算[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2008, 7(1): 76-80.
- [27] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算[J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1550-1559.
- [28] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592-597.
- [29] 刘晓星. 基于三维生态足迹的中国自然资本利用研究[D]. 辽宁 大连: 辽宁师范大学, 2019.
- [30] 郑怀军. 辽宁省生态足迹动态分析及驱动因素研究[D]. 辽宁 大连: 辽宁师范大学, 2013.
- [31] 王琳琳. 京津冀三维生态足迹演变趋势及驱动因素研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.