

洱海近岸菜地浅层地下水动态变化特征及影响因素

杨艳鲜¹, 张丹², 雷宝坤¹, 刘宏斌³, 翟丽梅³, 毛妍婷¹, 冯光恒⁴, 陈安强¹

(1. 云南省农业科学院 农业环境资源研究所, 昆明 650205; 2. 云南农业大学
资源与环境学院, 昆明 650201; 3. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所
农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 4. 云南省农业科学院, 昆明 650205)

摘要: 研究洱海近岸菜地浅层地下水埋深是合理调控浅层地下水位和防止土壤氮磷随浅层地下水流失的基础。通过对洱海近岸菜地2 a(2014年6月—2016年5月)浅层地下水埋深进行监测, 分析了浅层地下水埋深的时空变化特征和影响因素。结果表明, 洱海近岸菜地5个高程浅层地下水埋深均服从正态分布, 其平均值为25.21~45.07 cm, 变异系数在0.26~0.43之间。浅层地下水埋深旱季深、雨季浅, 其月变化和雨、旱季不同期, 存在滞后现象, 雨季浅层地下水埋深变异系数大于旱季。旱季和雨季浅层地下水埋深空间变化随等高线均呈不规则带状分布。洱海水位、降雨、灌溉、潜水蒸发和土壤物理特性的空间变异均是影响洱海近岸菜地浅层地下水埋深变化的主要因素。其中, 1 966 m高程浅层地下水埋深与洱海水位极显著线性相关($p < 0.01$), 二者互为连通, 相互补给; 其他高程浅层地下水埋深与降雨量和灌溉量显著线性相关($p < 0.05$), 随降雨量增加, 浅层地下水埋深逐渐变浅, 随潜水蒸发量和灌溉量增加, 浅层地下水埋深逐渐变深。距洱海由近及远土壤母质为河湖相沉积物到第四纪红黏土, 使得不同发生层土壤渗水性由强变弱, 造成离洱海越远, 海拔越高, 浅层地下水埋深越浅, 变幅越小。

关键词: 菜地; 洱海; 浅层地下水埋深; 时空变化; 影响因素

中图分类号: P641.74

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2017.12.017

杨艳鲜, 张丹, 雷宝坤, 等. 洱海近岸菜地浅层地下水动态变化特征及影响因素[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12): 101-109.

0 引言

浅层地下水是可利用水资源的重要组成部分, 也是陆地水循环系统中的重要环节, 对于维持河流、湖泊、湿地水量平衡及农业种植和植物生长需水的稳定供给具有重要意义^[1]。浅层地下水是降水、地表水、土壤水、地下水之间转化消长过程的集中反映, 其埋深是评价地下水环境要素的重要指标^[2]。揭示浅层地下水埋深的时空变异规律及分布状况是地下水资源可持续利用和生态环境保护的前提。近年来, 大多学者采用地统计学方法对浅层地下水埋深时空变异特征及其影响因素进行研究, 空间尺度上地下水埋深呈中等空间自相关性^[3-5], 时间序列上浅层地下水埋深在年际和年内差异显著, 这种时空差异是对地貌特征、降雨和地下水利用程度的响应^[1-2, 6-7]。浅层地下水接受降水和地表水体的直接补给, 其埋深变化除受降雨、蒸发、地形、植被、包气带土壤特性等自然因素的影响和制约^[5, 7-8], 还受人为因素的影响, 特别是随着农田集约化程度的提高和土地利用的增强, 浅层地下水埋深变化与种植结构、耕作模式、灌溉制度密切相关^[9-11], 而且浅层地下水埋深变化也间接影响到浅层地下水污染物^[12]和土壤剖面中盐分^[5]的变化。

云南大理洱海西岸常年连片露地蔬菜种植区面积为800~870 hm², 该区菜地耕作强度高, 肥料投入量大, 导致氮磷等营养盐在土壤中过量累积, 同时, 降雨、灌溉和海水的反渗造成洱海近岸菜地浅层地下水埋深较浅, 二者共同影响下, 使得富集在土壤中的氮磷等营养盐极易流失。洱海近岸菜地紧靠洱海, 使得该区成为水-陆域生态系统进行物质和能量交换的最重要中间场所, 其中, 浅层地下水是其物质和能量交换过程

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401248, 41661048); 云南省农科院环资所所长基金项目(hz2013001); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07105-001)

作者简介: 杨艳鲜(1977-), 女, 副研究员, 主要从事农业面源污染相关研究工作。E-mail: yyyx99@163.com

通信作者: 陈安强(1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事面源污染等研究。E-mail: chaq163@163.com

的重要载体之一,特别是浅层地下水位的波动显著影响着水-陆域生态系统物质和能量交换的速率及影响范围^[13]。这种交换不但影响着近岸菜地土壤氮磷等营养盐的流失,而且还影响着洱海近岸水质和水生态环境安全^[14-15]。因此,研究洱海近岸菜地浅层地下水动态变化特征及影响因素,对合理调控浅层地下水位,防止土壤中大量氮磷等营养盐通过浅层地下水快速流失,保护洱海水环境安全具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省大理州下关市洱海西岸苍山与洱海之间的山前斜坡台地(100°12'E,25°40'N,海拔1 966~1 980 m)。该区属亚热带高原季风气候区,年平均气温15.7℃,年降水量1 000~1 200 mm,受季风气候影响,干湿季分明,降水主要集中在6—10月(雨季),约占年降水量的85%~90%,11月至次年5月(旱季)约占年降水量的10%~15%。研究区地势西高东低,坡度1°~7°,地表径流和地下径流自西向东流入洱海。研究区内有第四纪松散砂砾堆积体形成的较厚包气带,主要由黏土、粉细砂、中粗砂和卵砾石构成。苍山18溪流经该堆积体,形成了洱海西岸三角洲^[6]。三角洲的山前带和扇缘带含水层厚度为20~50 m,涌水量为30~50 m³/(h·m)^[17]。地下水补给来源主要为降雨、灌溉的垂向补给和洱海水的侧向补给。区内虽有村庄零星分布,但居民用水来自苍山泉水,菜地灌溉用水取自洱海,地下水开发利用程度低。

研究区为蔬菜连片种植区,沿苍山脚下呈梯级延伸至洱海边,面积约78.2 hm²,自20世纪80年代中后期由稻田改种蔬菜,现为下关市的露地蔬菜基地。蔬菜种类主要为甘蓝、白菜、青笋等叶茎类菜,1年种植3季。一般在5月底种植白菜,9月中旬收获;10月中旬种植青笋,1月底收获;2月中旬种植甘蓝,4月底收获。种植方式为育苗移栽,移栽时施入底肥,移栽30 d后进行追肥,3季蔬菜肥料用量基本相同,全年有机肥、N、P₂O₅和K₂O施用量分别为225 t/hm²和1 710、225、450 kg/hm²,过量施肥造成大量氮磷元素通过地表径流和地下水侧向径流流失,对洱海水环境质量造成影响。

1.2 数据来源与监测方法

浅层地下水埋深监测点沿等高线布设,共20个,监测点位置如图1所示。观测装置采用直径75 mm且底部密封的PVC管制成,距PVC管底端15 cm处沿管壁四周钻直径为5 mm的圆孔,用0.5 mm的尼龙网覆盖。观测装置埋设深度应保证其底部进水孔略低于常年最低浅层地下水位。埋设后在PVC管内和管外填入30 cm高的细沙作为反滤层,四周用挖出的土紧密填埋,PVC管上端口高出地面30 cm,不观测时用盖子拧紧。浅层地下水埋深观测期为2014年6月—2016年5月,在每月的5、15和25日分别测定。

埋PVC管的同时,沿等高线选择一点挖取土壤剖面,根据土壤发生层取环刀样和土壤样,测定土壤的机械组成、体积质量、孔隙度^[18]和渗透系数^[19]。降雨量和灌溉量数据来源于研究区内的全国农业面源污染国控监测点监测的降雨和灌溉数据;洱海水位来源于大理洱海保护管理局,大气蒸发力 E_{20} 数据来源于大理气象站。

潜水蒸发强度计算式^[20]为: $E=0.569\ 6E_{20}^{0.552\ 3}(1-H/5)^{2.718\ 4}$ 。其中: E 为潜水蒸发强度(mm/d); E_{20} 为大气蒸发力,即用直径20 cm蒸发皿测定的蒸发量(mm/d); H 为浅层地下水埋深(m)。

1.3 数据统计分析

浅层地下水埋深的描述性统计用SPSS 10.0 软件分析,采用GIS软件的Kriging算法对研究区地下水埋深进行空间插值分析,并绘制地下水埋深等值线图。

2 结果与讨论

2.1 浅层地下水埋深统计特征值

表1为研究区浅层地下水埋深的描述性统计特征值。由表1可知,洱海近岸菜地不同高程浅层地下水埋深平均值和中位数相差不大,经K-S检验发现浅层地下水埋深均服从正态分布。1 966、1 970、1 972和

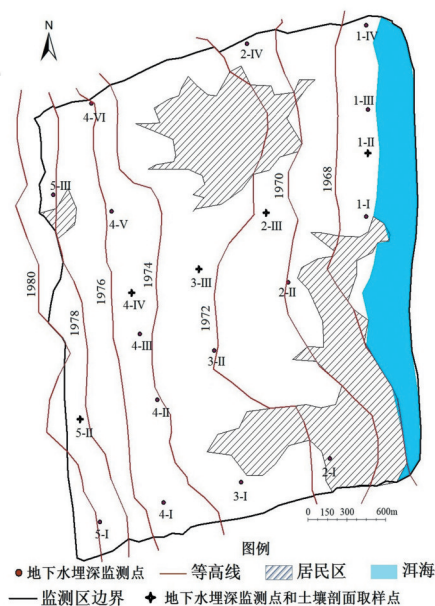


图1 浅层地下水埋深监测点分布

1 975 m 高程浅层地下水埋深变幅相差不大,远大于 1 979 m 高程浅层地下水埋深变幅(25.9 cm)。不同高程浅层地下水埋深平均值为 25.21~45.07 cm,其中,1 966 m 高程浅层地下水埋深最深,为 45.07 cm,大于其他高程浅层地下水埋深。不同高程浅层地下水埋深变异系数在 0.26~0.43 之间,属于中等变异强度,且 1 966 m 高程浅层地下水埋深变异系数(0.43)大于其他高程浅层地下水埋深变异系数。可见,随海拔增加和离洱海越远,浅层地下水埋深越浅,且变幅越小。

表 1 浅层地下水埋深的描述性统计特征值

高程/m	样本个数	分布类型	最浅埋深/cm	最深埋深/cm	变幅/cm	平均值/cm	中位数/cm	标准差	变异系数
1 966	96	正态分布	11.5	90.0	78.5	45.07	42	19.47	0.43
1 970	96		10.0	71.0	61	39.93	40	13.48	0.34
1 972	72		4.5	80.0	75.5	39.76	38	16.68	0.42
1 975	144		4.0	76.0	72	29.08	27.5	9.72	0.33
1 979	72		13.1	39.0	25.9	25.21	24.6	6.67	0.26

2.2 浅层地下水埋深时空变化特征

分析图 2 可知,2014 年 6 月—2016 年 5 月,洱海近岸菜地不同高程浅层地下水埋深月波动均较大,除 1966 m 高程浅层地下水埋深,其他高程浅层地下水埋深较浅的月份主要为 6—11 月(雨季为 6—10 月),12 月至次年 5 月(旱季为 11 月至次年 5 月)浅层地下水埋深较深,可见,浅层地下水埋深与降雨多寡密切相关,旱季均高于雨季,这与杨静等^[8]研究的喀斯特峰丛洼地浅层地下水埋深随雨、旱季变化趋势一致。而 1966 m 高程的浅层地下水埋深较浅的月份主要为 8 月至次年 1 月,浅层地下水埋深较深的月份为 2—7 月,与其他高程的浅层地下水埋深月变化和雨、旱季呈现不同步变化。

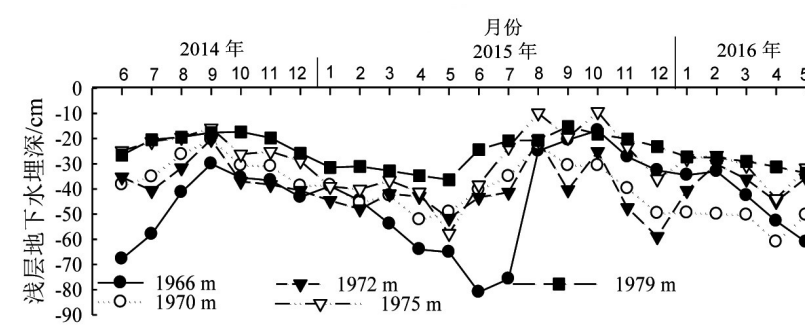


图 2 浅层地下水埋深动态变化

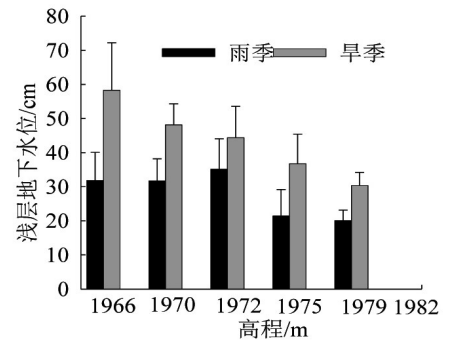


图 3 浅层地下水埋深的季节变化

对雨季(6—11 月)和旱季(12 月至次年 5 月)不同高程浅层地下水埋深求平均值(其中,1966 m 高程的雨季和旱季分别用 8 月至次年的 1 月和 2—7 月的浅层地下水埋深),5 个高程浅层地下水埋深雨季均比旱季浅(图 3)。随着高程增加,雨季浅层地下水平均埋深分别为 35.85 cm(1 966 m)、31.72 cm(1 970 m)、35.13 cm(1 972 m)、21.43 cm(1 975 m)和 20.07 cm(1 979 m),旱季分别为 58.05 cm(1 966 m)、49.03 cm(1 970 m)、45.61 cm(1 972 m)、37.06 cm(1 975 m)、30.19 cm(1 979 m),可见,雨季 1 972、1 966 m 和 1 970 m 高程浅层地下水埋深远大于 1 975 m 和 1 979 m 高程,旱季浅层地下水埋深随海拔增加而变浅。雨季($0.15 < CV < 0.36$)不同高程浅层地下水埋深的变异系数明显大于旱季($0.13 < CV < 0.25$),说明雨季水位波动较旱季强烈,主要是因为降雨量和降雨强度显著影响浅层地下水埋深的波动^[21];另外,浅层地下水埋深越浅,变异系数越大,波动越剧烈,这与李朝生等^[22]研究结果一致。

为反映浅层地下水埋深的随机性和结构性、独立性和相关性的特点,更准确、直观地描述洱海近岸菜地浅层地下水埋深的时空分布特征,运用 Kriging 最优内插法进行估算^[4],并绘制浅层地下水埋深等值线图(图 4)。由图 4 可以看出,旱季和雨季浅层地下水埋深随等高线均呈不规则的带状分布,随高程的减小,距洱海由远及近,浅层地下水埋深分布呈现出由浅到深的带状变化。旱季和雨季相应分级下的浅层地下水埋深带状变化区域不尽一致,其中,旱季和雨季浅层地下水埋深较浅的分布区一致,即为高程 1 975 m 和 1 979 m 区域,但浅层地下水埋深较深的分布区空间变异较大,旱季为高程 1 966 m 和 1 970 m 区域,而雨季为高程 1 972 m 区域,说明在降雨一致的条件,微地形变化和地质条件可能是影响浅层地下水埋深

空间变异的主要原因^[22]。

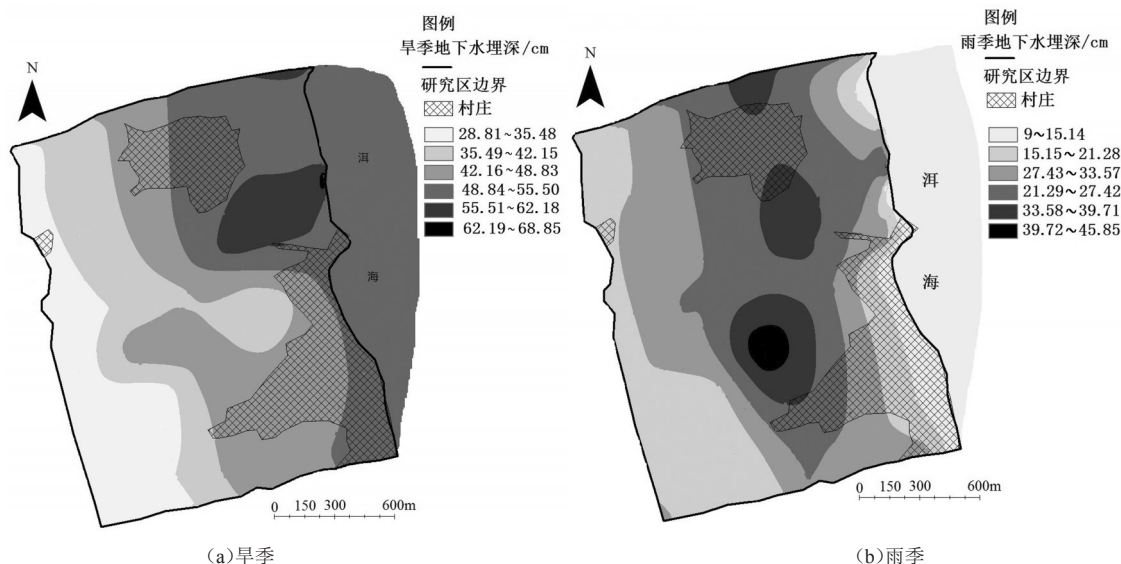


图4 浅层地下水埋深时空变化特征

2.3 研究区浅层地下水埋深变化的影响因素

2.3.1 降雨对浅层地下水埋深的影响

降雨为浅层地下水的主要补给源^[2-3,7-8,21],降雨量、降雨强度、降雨类型和降雨历时等降雨特性都引起浅层地下水埋深的变化^[22,24]。由图2和图5(a)可知,除1966 m高程,其他高程浅层地下水埋深与月降雨量变化趋势基本一致,在洱海流域,每年6—10月为雨季,降雨量较多,11月至次年5月为旱季,没有降雨或未形成补给浅层地下水的有效降雨。虽然浅层地下水埋深受降雨影响大,但其埋深对降雨的响应存在一定滞后效应,这与刘效东等^[2]的研究结果一致,随着降雨量不断增加和累积,洱海近岸菜地浅层地下水埋深随之变浅。旱季随着降雨量不断减少,洱海近岸菜地浅层地下水埋深随之变深。可见,夏季降雨量是浅层地下水主要的补给源,而浅层地下水在水力坡度下沿山前台地向洱海侧向迁移是主要排泄项。

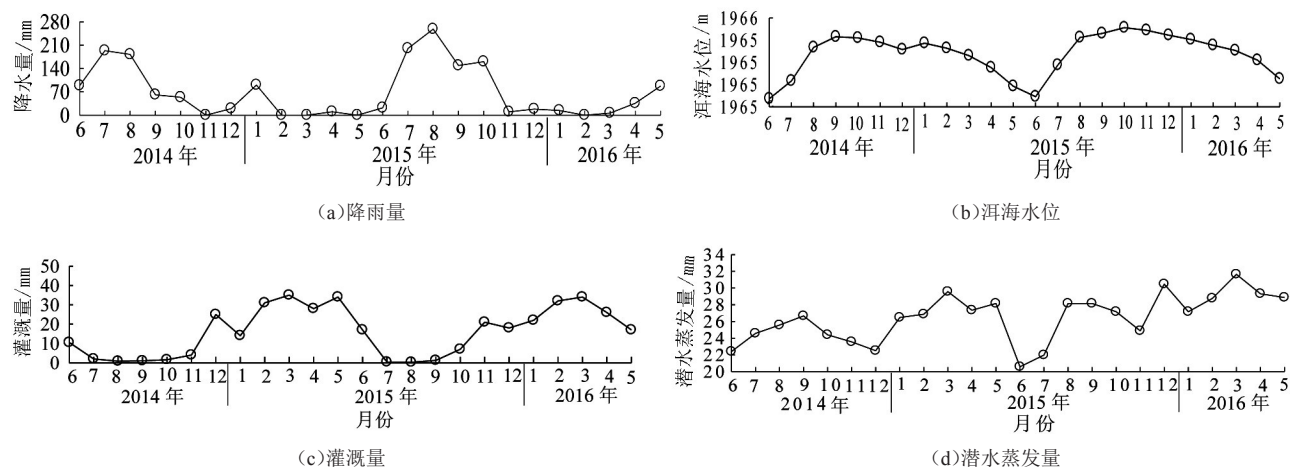


图5 影响浅层地下水埋深的因素

月降雨量和浅层地下水埋深回归分析表明(图6),随着降雨量不断增加,5个高程浅层地下水埋深逐渐变浅,除1966 m高程浅层地下水埋深对月降雨量的相关性不显著外($p=0.62$),其他高程均呈显著线性相关($p<0.05$),说明1970 m~1979 m高程的浅层地下水为降雨补给型。这与刘效东等^[2]、程训强等^[24]、孙傲等^[25]研究结果一致。王明珠等^[3]研究认为浅层地下水埋深与降雨的相关性随着高程的下降而降低,而本研究认为高程对浅层地下水埋深与降雨相关性的影响不显著。

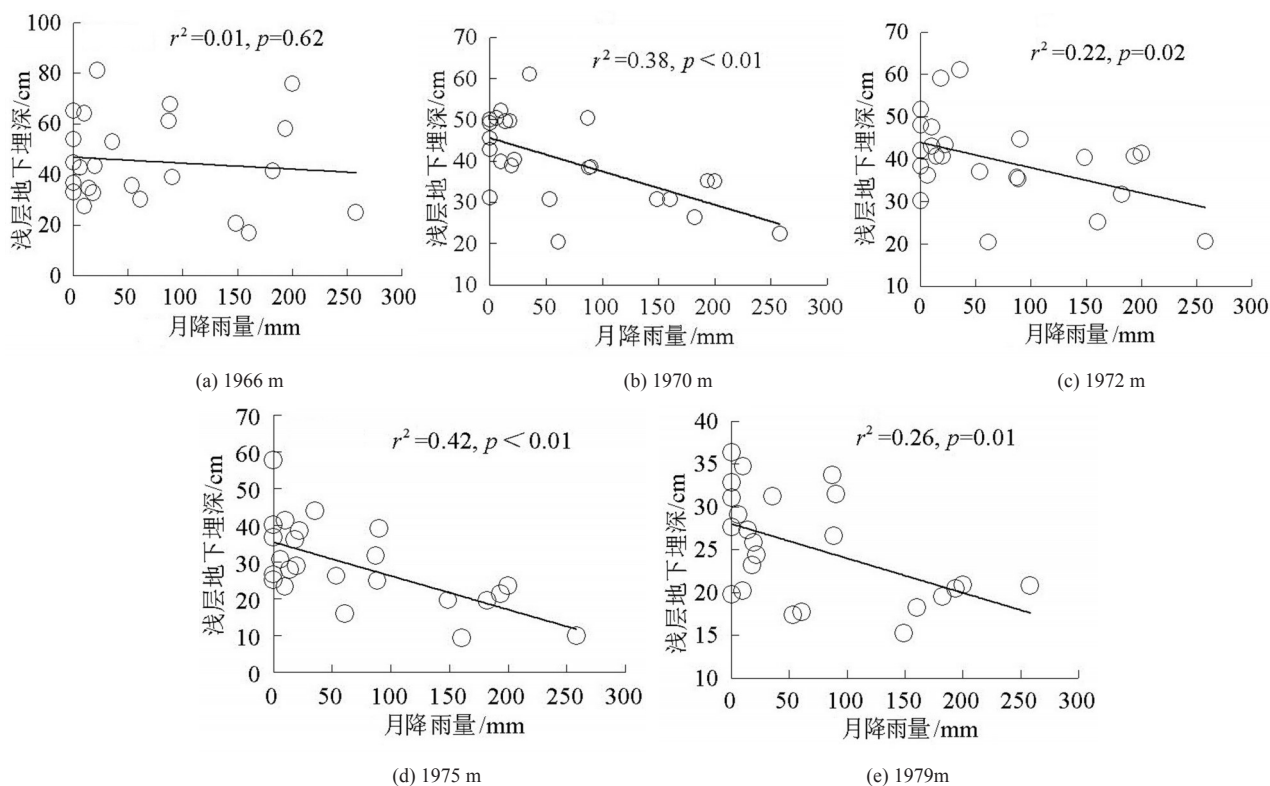
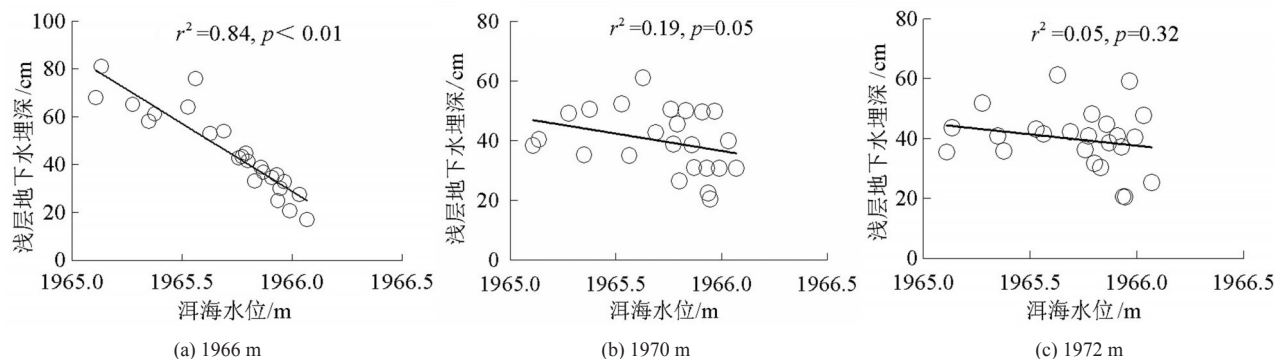


图6 浅层地下水埋深与降雨量的关系

2.3.2 洱海水位对浅层地下水埋深的影响

洱海水位对浅层地下水埋深的影响主要表现在湖水补给地下水距浅层地下水观测点的空间位置及高程上,一般认为距离补给水源越近,且补给水源与浅层地下水埋深观测点高差越接近,对浅层地下水埋深影响越明显^[3]。由图2和图5(b)可知,1966 m高程的浅层地下水埋深与洱海水位变化一致,而其他高程的浅层地下水埋深与洱海水位变化趋势不尽一致。影响洱海水位的主要因素有降雨、四周山脉的溪(径)流、农业灌溉等,在旱季(11月至次年5月)洱海水是周边农田及“引洱入宾”工程农田的主要灌溉水源,使得洱海水位下降较多,而在雨季灌溉需水减少,且降雨对洱海水补给存在滞后现象,使得8月至次年2月洱海水位较高,其他月份较低。1966 m高程浅层地下水埋深观测点离洱海最近,且二者高差接近,该高程浅层地下水与洱海水互为连通,相互补排,这与王明珠等^[3]认为的浅层地下水埋深与补给水源和相对高差呈显著相关结论一致。徐华山等^[26]研究认为滨河湿地地下水位受河水水位影响显著,地下水位波动幅度与河岸距离之间存在明显的负指数关系,也与本研究的结果类似。其他高程浅层地下水埋深观测点距离洱海较远,且高程相差较大,湖水补给浅层地下水的可能性小。对洱海水位和浅层地下水埋深进行回归分析(图7),表明随洱海水位增加,浅层地下水埋深逐渐变浅,其中1966 m高程浅层地下水埋深与洱海水位呈极显著线性相关($p<0.01$),这也与1966 m高程浅层地下水埋深与洱海水互相连通、互为补排的事实相符,说明1966 m高程浅层地下水为湖水补给型。其他高程的浅层地下水埋深与洱海水位相关不显著($p>0.05$),而且二者高差相差较大。



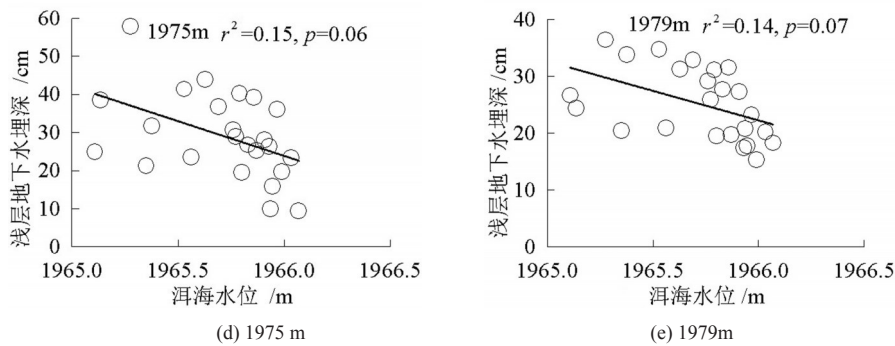


图7 浅层地下水埋深与洱海水位的关系

2.3.3 灌溉对浅层地下水埋深的影响

灌溉是引起浅层地下水位变化的重要因素。由图2和图5(c)可知,灌溉量与浅层地下水埋深呈相反的变化趋势,灌溉量越大,浅层地下水埋深越深,主要是因为旱季降雨量少,土壤含水量低,蒸发量和作物需水量大,增加的灌溉量仅能满足作物需水和蒸发的损失,难以通过土壤入渗补给浅层地下水,使得浅层地下水埋深持续变深,在水力坡度下浅层地下水的侧向运移依然存在。对灌溉量和浅层地下水埋深进行回归分析(图8),表明随灌溉量增加,浅层地下水埋深逐渐变深,其中1966 m与1972 m高程的浅层地下水埋深与灌溉量线性相关不显著($p>0.05$),其他高程的浅层地下水埋深与灌溉量呈显著相关($p<0.05$)。

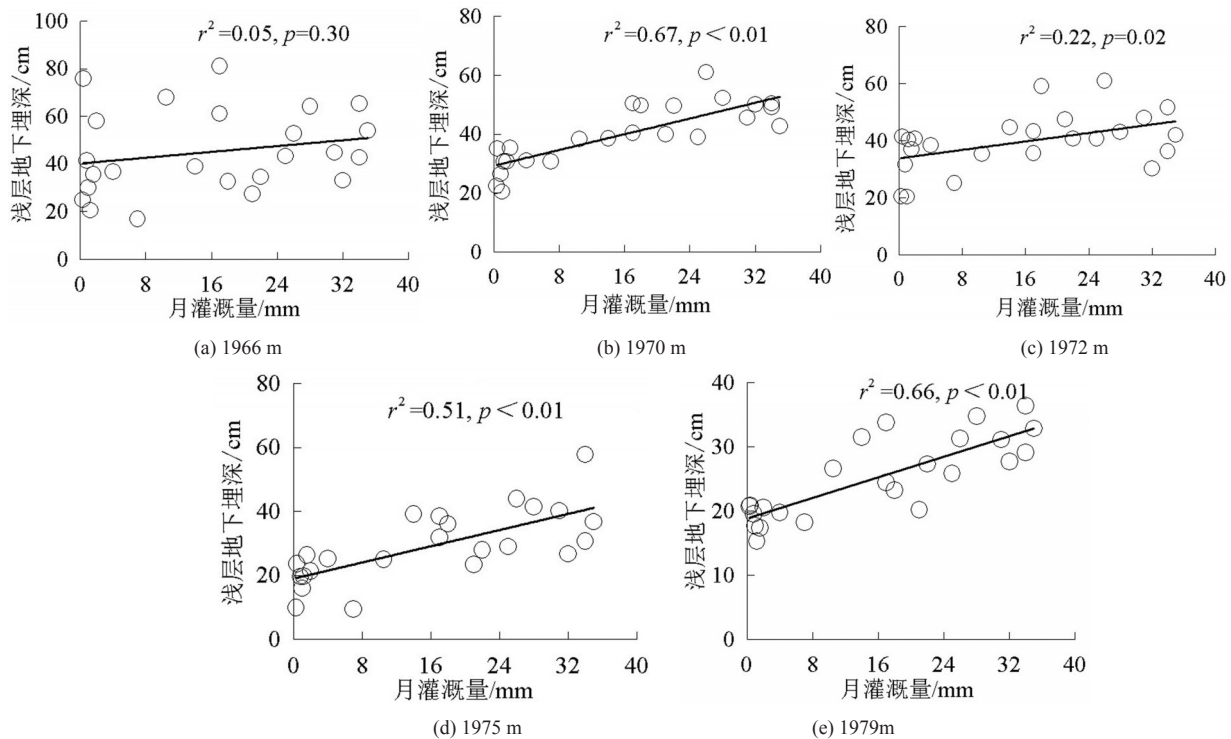


图8 浅层地下水埋深与灌溉量的关系

2.3.4 潜水蒸发对浅层地下水埋深的影响

潜水蒸发量随着浅层地下水埋深的增加而减少,埋深增加到一定程度,潜水蒸发量基本保持稳定^[27],浅层地下水埋深越浅,潜水蒸发越剧烈,但潜水蒸发量又受气象、作物和土壤质地等因素的影响^[28]。分析图2和图5(d)可知,月潜水蒸发量在8—9月和1—5月会出现峰值,雨季的峰值小于旱季,这与温度、降雨量和空气干燥度密切相关,相应的浅层地下水埋深在8—9月埋深较浅,1—5月埋深较深,雨季潜水蒸发量与浅层地下水埋深显著负相关($r=-0.934$),旱季二者正相关但不显著($r=0.193$),可见,雨季降雨是影响地下水埋深的关键因素,而旱季潜水蒸发对地下水埋深较雨季大,是浅层地下水重要的排泄途径。对潜水月蒸发量和浅层地下水埋深进行回归分析(图9),表明除了1966 m高程浅层地下水,其他高程浅层地下水埋深随潜水蒸发量的增加而增加,说明蒸发量越大,浅层地下水埋深越深,但除了1970 m高程浅层地下水埋深与潜水蒸发量显著相关外($p<0.05$),其他高程相关不显著($p>0.05$),说明较其他因素,潜水蒸发对浅层地下水埋深

波动影响较小。

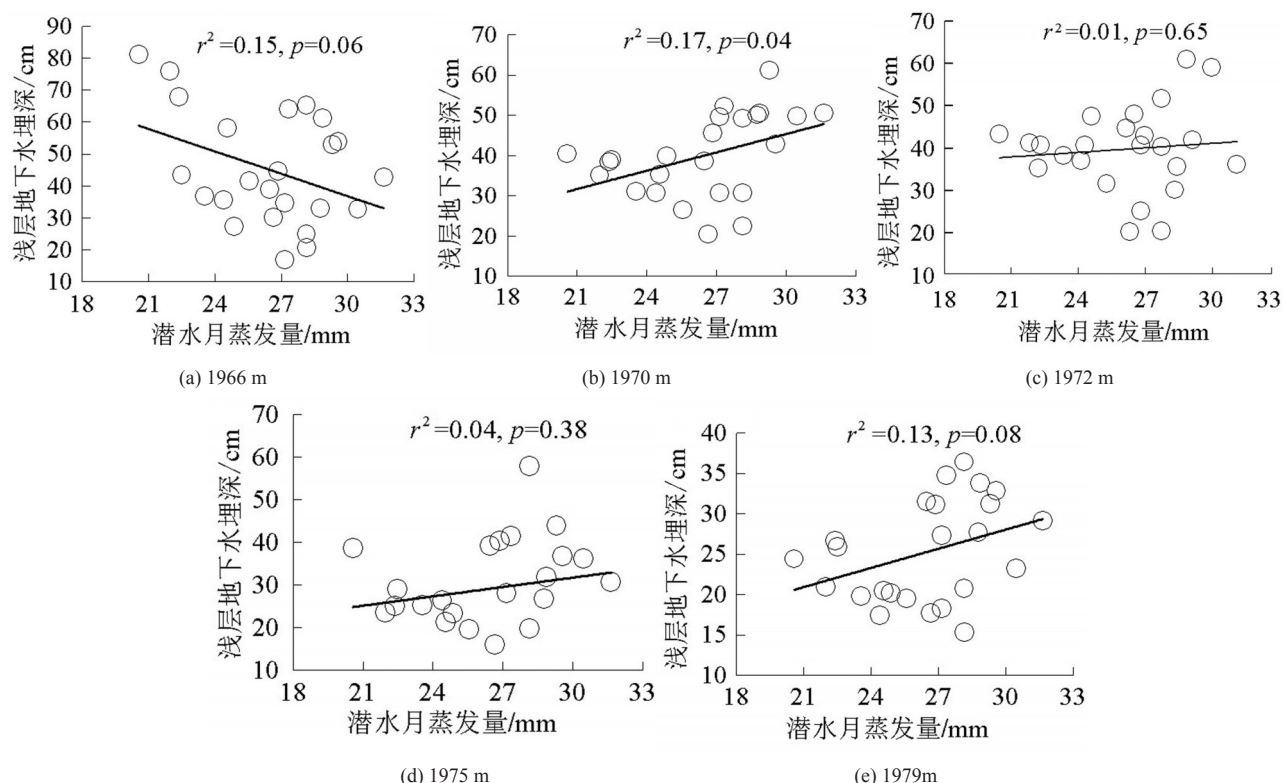


图9 浅层地下水埋深与潜水蒸发量的关系

2.3.5 土壤物理特性对浅层地下水埋深的影响

除了降雨、灌溉、潜水蒸发和补给水源远近影响浅层地下水埋深外,浅层地下水埋深还受母质、土壤类型、土层厚度等结构性因素的影响^[22]。由表2可知,1 966 m和1 970 m高程土壤母质为河湖相沉积物,由于河湖相沉积物主要由粒径较大、分选较好的粉砂和少量极细砂组成^[20],使得土壤发生层的A、P层沙粒较少,粉黏粒较多,而W、G层沙粒量多,粉黏粒少,而且各土壤发生层孔隙度大,土壤渗透性好,降雨入渗、蒸发、浅层地下水侧向流动性较强,因此,越靠近洱海,浅层地下水埋深受洱海水波动的影响较大,埋深较深,变幅较大。1 972、1 975、1 979 m高程土壤母质为第四纪红黏土,土壤发生层分为A、P、C层,除了耕层A沙粒较多,土壤体积分质量小,孔隙较大,透水性好外,其他土壤发生层粉黏粒较多,土壤体积分质量大和孔隙度较小,土壤黏重紧实,透水性差,土壤的这些物理特性使得在大量降雨或灌溉后,土壤水分渗透过A层后,在P、C层渗透缓慢,在较浅的土层就形成了潜水位,所以,1 972、1 975、1 979 m高程浅层地下水埋深较浅,变异程度小。

表2 不同高程土壤发生层物理特性

海拔/m	成土母质	土壤发生层	深度/m 0~30	沙粒量/% 0.05~2 mm	粉粒量/% 0.002~0.05 mm	黏粒量/% <0.002 mm	体积分质量/ (g·cm ⁻³)	孔隙度/%	渗透系数/ (mm·min ⁻¹)
1 966	河湖相沉积物	A	0~30	34.91	56.76	8.33	0.91	55.84	2.4×10 ⁻¹
		P	30~40	37.32	57.12	5.56	1.36	47.27	1.8×10 ⁻²
		W	40~60	42.25	57.10	0.66	1.36	48.47	1.92×10 ⁻¹
		G	>60	72.39	26.02	1.59	1.46	61.51	2.10
1 970	河湖相沉积物	A	0~30	33.42	53.37	13.21	0.95	54.21	2.22×10 ⁻¹
		P	30~45	37.32	57.12	5.56	1.37	46.47	1.26×10 ⁻²
		W	45~65	47.88	50.10	2.02	1.39	50.55	3.12×10 ⁻¹
		G	>65	70.68	26.02	3.30	1.47	59.88	1.74
1 972	第四纪红黏土	A	0~30	33.62	62.56	3.82	0.89	59.81	3.3×10 ⁻¹
		P	30~60	35.49	60.98	3.53	0.94	50.16	5.40×10 ⁻³
		C	>60	24.37	62.72	12.91	1.56	41.21	3.60×10 ⁻⁴
1 975	第四纪红黏土	A	0~30	29.96	59.28	10.76	0.99	53.92	1.68×10 ⁻¹
		P	30~55	28.14	60.17	11.68	1.44	44.50	2.40×10 ⁻³
		C	>55	24.71	58.39	16.90	1.52	40.97	3.00×10 ⁻⁵
1 979	第四纪红黏土	A	0~30	29.43	58.24	12.33	1.02	52.24	1.38×10 ⁻¹
		P	30~45	25.14	61.23	13.63	1.48	43.25	6.00×10 ⁻⁴
		C	>45	23.71	58.66	17.63	1.53	39.66	4.80×10 ⁻⁵

3 结论

1) 洱海近岸菜地5个高程浅层地下水埋深均服从正态分布,浅层地下水埋深平均值为25.21~45.07 cm,变异系数在0.26~0.43之间,属于中等变异强度。1966 m高程浅层地下水埋深最深(45.07 cm),变异程度最大(0.43),随海拔升高,浅层地下水埋深逐渐变浅,变幅越小。

2) 浅层地下水埋深较浅和较深的月变化和雨、旱季不同期,呈滞后现象,旱季浅层地下水埋深大于雨季,雨季($0.15 < CV < 0.36$)浅层地下水埋深的变异系数明显大于旱季($0.13 < CV < 0.25$),浅层地下水埋深越浅,变异系数越大,水位波动越剧烈。旱季和雨季浅层地下水埋深空间变化随等高线均呈不规则带状分布,旱季和雨季相应分级下的浅层地下水埋深带状变化区域不尽一致。

3) 1966 m高程浅层地下水埋深与洱海水位呈极显著线性相关($p < 0.01$),该高程浅层地下水与洱海水互为联通,相互补给,为湖水补给型。其他高程浅层地下水埋深与降雨量和灌溉量呈显著线性相关($p < 0.05$),随着降雨量增加,浅层地下水埋深逐渐变浅,随灌溉量和潜水蒸发量增加,浅层地下水逐渐变深,为降雨入渗补给型。距洱海由近及远土壤母质为河湖相沉积物到第四纪红黏土,造成了不同土壤发生层渗水性由强变弱,所以,随着离洱海越远,浅层地下水埋深越浅,变幅越小。雨季降雨是浅层地下水主要的补给源,旱季灌溉对浅层地下水的有效补给作用较小,潜水蒸发和浅层地下水在水力坡度下的侧向迁移是浅层地下水的主要排泄项。

参考文献:

- [1] 夏晶,刘宁,高贺文,等. 商丘市浅层地下水位下降对区域气候的影响[J]. 生态学报,2010,30(16): 4408-4415.
- [2] 刘效东,周国逸,张德强,等. 鼎湖山流域下游浅层地下水动态变化及其机理研究[J]. 生态科学,2013,32(2): 137-143.
- [3] 王明珠,李江涛,吴美春,等. 低丘红壤区潜水时空变化特征—以江西省余江县为试区[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(1): 1-4.
- [4] 李新波,郝晋珉,胡克林,等. 集约化农业生产区浅层地下水埋深的时空变异规律[J]. 农业工程学报,2008,24(4): 95-98.
- [5] 姚荣江,杨劲松. 黄河三角洲地区浅层地下水与耕层土壤积盐空间分异规律定量分析[J]. 农业工程学报,2007,23(8): 45-51.
- [6] ZHANG X L, REN L, KONG X B. Estimating spatiotemporal variability and sustainability of shallow groundwater in a well-irrigated plain of the Haihe River basin using SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2016,541: 1221-1240.
- [7] 马艳敏,李建平,王颖,等. 吉林省中西部浅层地下水位时空变化特征及与降水的关系[J]. 干旱气象,2015,33(6): 994-999.
- [8] 杨静,陈洪松,聂云鹏,等. 典型喀斯特峰丛洼地降雨特性及浅层地下水埋深变化特征[J]. 水土保持学报,2012,26(5): 239-243.
- [9] 张光辉,费宇红,刘春华,等. 华北漳滙平原地下水位下降与灌溉农业关系[J]. 水科学进展,2013,24(2): 227-232.
- [10] MASİYANDIMA M, STOEP I V D, MWANASAWANI T, et al. Groundwater management strategies and their implications on irrigated agriculture: the case of Dendron aquifer in Northern Province, South Africa [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(11/12): 935-940.
- [11] 白亮亮,蔡甲冰,刘钰,等. 灌区种植结构时空变化及其与地下水相关性分析[J]. 农业机械学报,2016,47(9): 202-210.
- [12] 郭卉,虞敏达,何小松,等. 南方典型农田区浅层地下水污染特征[J]. 环境科学,2016,37(12): 4680-4689.
- [13] 李世峰,白顺果,杨洋,等. 水位波动条件下土层中硝态氮迁移转化数值模拟[J]. 土壤通报,2014,45(5): 1077-1082.
- [14] 任泽,杨顺益,汪兴中,等. 洱海流域水质时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报,2011,27(4): 14-20.
- [15] 王显丽,姜国强,周雯,等. 基于洱海水生态特征的流域最大日负荷总量控制[J]. 湖泊科学,2016,28(2): 271-280.
- [16] 张春生,杨业州. 洱海西岸辫状三角洲沉积[J]. 江汉石油学院学报,1994,16(4): 28-33.
- [17] 汤承彬. 洱海水位与湖区地下水位相关研究[J]. 云南环保. 1988(1): 40-47.
- [18] 鲁如坤. 土壤和农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等. 土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J]. 农业工程学报,2011,27(5): 68-72.
- [20] 胡顺军,康绍忠,宋郁东,等. 塔里木盆地潜水蒸发规律与计算方法研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2): 49-53.
- [21] 袁瑞强,刘贯群,宋献方. 现代黄河三角洲浅层地下水对降水的响应[J]. 资源科学,2009,31(9): 1514-1521.
- [22] 李朝生,杨晓晖,张克斌,等. 沙漠—绿洲系统中降雨、土壤水分与地下水位响应特征[J]. 北京林业大学学报,2007,29(4): 129-135.
- [23] 姚荣江,杨劲松,刘广明. 黄河三角洲地区典型地块地下水特征的空间变异性研究[J]. 土壤通报,2006,37(6): 1071-1075.
- [24] 程训强,王明珠,唐家良,等. 低丘红壤区不同降雨类型对浅层地下水位动态变化的影响——以江西省余江县为例[J]. 山地学报,2011,29(1): 55-61.
- [25] 孙傲,刘廷玺,杨大文,等. 科尔沁沙丘—草甸相间地区不同地貌类型地下水位对降雨的响应研究[J]. 干旱区地理,2016,39(5): 1059-1069.
- [26] 徐华山,赵同谦,孟红旗,等. 滨河湿地地下水水位变化及其与河水响应关系研究[J]. 环境科学,2011,32(2): 362-367.
- [27] 白亮亮,蔡甲冰,刘钰,等. 解放闸灌域农田耗水时空变化特征及灌溉效率评价[J]. 中国农村水利水电,2016(9): 68-72.
- [28] 刘路广,崔远来,冯跃华. 引黄灌区潜水蒸发规律与计算方法研究[J]. 灌溉排水学报,2011,30(3): 18-22,33.

Dynamics of Shallow Groundwater table and the Factors Impacting It in the Nearshore Vegetable Field of the Erhai Lake

YANG Yanxian¹, ZHANG Dan², LEI Baokun¹, LIU Hongbin³,
ZHAI Limei³, MAO Yanting¹, FENG Guangheng⁴, CHEN Anqiang¹

(1. Agricultural Environment and Resources Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 2. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 4. Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: Understanding the dynamics of shallow groundwater table in the nearshore vegetable field of the Erhai Lake was essential for regulating groundwater resources and preventing nitrogen and phosphorus leaching. Based on groundwater data measured from June 2014 to May 2016 in the nearshore vegetable field, we analyzed the dynamics of the groundwater depth and the factors affecting it. The results showed that the shallow groundwater depth at different elevations showed a normal distribution and the average depth of shallow groundwater table was from 25.21 cm to 45.07 cm with variation coefficient of 0.26 to 0.43. The shallow groundwater depth was deeper in the dry season than in the rainy season, and its monthly variation in the rainy seasons differs from that in dry seasons, characterized by a hysteresis. The variation coefficient of the shallow groundwater depth in the rainy season was greater than that in the dry season. The spatial variation of the shallow groundwater depth showed irregular distribution. The water level of the Erhai Lake, rainfall, irrigation, phreatic evaporation and spatial variability of soil physical properties were the main factors that affect the shallow groundwater depth in the nearshore vegetable field. There was a good linear correlation between the shallow groundwater water depth at elevation of 1966 m and the water level of the Erhai Lake ($p < 0.01$). There were also good linear correlations between the shallow groundwater depths in other areas and the rainfall, irrigation ($p < 0.05$). The soil parental material was from river-lacustrine facies deposits into Quaternary red clay away from the Erhai Lake, and the permeability of different soil genesis were from stronger to weaker. These factors caused shallow groundwater depth was shallower and the smaller change range of water level with the farther away from the Erhai Lake and the higher the altitude.

Key words: vegetable field; Erhai Lake; shallow groundwater depth; spatial and temporal variation; influencing factors

责任编辑: 陆红飞