

天然文岩渠流域浅层地下水状况 与土壤盐渍化的关系

刘福汉 黎立群 陈章英 王遵亲

(中国科学院南京土壤研究所)

摘 要

讨论了天然文岩渠流域的浅层地下水的补给源、埋深、矿化度与土壤盐渍化的关系。本流域浅层地下水有两个补给源：大气降水和黄河侧渗水，由于年降水量分配不均，在雨季，大气降水有利于土壤脱盐，而无雨的旱季则土壤积盐过程加速。黄河侧渗水使背河洼地的地下水位经常保持在1—1.6m，从而使70—80%的土壤发生盐渍化。浅层地下水的埋深、矿化度与土壤积盐过程关系密切。浅层地下水的盐分积累与土壤的盐分积累之间既存在着明显的一致性又有某些差异性。在碱性的低矿化度水的作用下，本流域还有一定面积的苏打盐土和碱化土壤存在。

浅层地下水是黄淮海平原主要水资源之一，它既是构成农业生产条件的一个重要方面，也是导致土壤发生盐渍化的重要原因。因此，进行地下水状况和性质的调查和研究，对研究土壤盐渍化的发生、演变、预测预报和综合改良利用具有重大的现实意义。

天然文岩渠流域位于河南省黄河北岸平原区，地跨新乡和濮阳两市，分属原阳、延津、封丘和长垣四个县，东边和南边都以黄河为界，总面积为2514平方公里^[1]。在半干旱一半湿润季节气候条件及现代黄河高悬的特殊水文地质条件下，致使本流域土壤产生了盐渍化。本文从本流域的浅层地下水的补给源、埋深、矿化度、化学组成及其地形地貌特点讨论了浅层地下水与土壤盐渍化的关系，并初步阐述了浅层地下水对土壤盐渍化的发生、演变的作用和影响。

一、天然文岩渠流域浅层地下水的补给源与土壤盐渍化

天然文岩渠流域浅层地下水的补给源主要是：

(一) **大气降水补给** 大气降水对该流域地下水的补给起着主要作用，直接影响浅层地下水的变化，继而影响土壤的积盐和脱盐。一般来说，降水对于增加潜水贮量，淋洗土壤盐分是有利的，但由于受季节的影响，造成年降水量分配不均，从而出现了无雨的旱季和降水集中的雨季。根据降水资料的多年平均，降水分配为：12月—2月占3%；3月—5月占16%；6月—8月占59%；9月—11月占22%。由于雨季(6月—8月)降水过多，加之该流域的排水条件不良，常有内涝积水，引起地下水位抬高，从而为旱季土壤强烈积盐奠定了基础。

(二) **黄河侧渗补给** 本流域临近黄河，号称地上悬河的黄河，它对堤北背河洼地(即黄河浸润区)浅层地下水有显著地补给作用。一方面，抬高了地下水位，产生内涝；另一方面，这些借助侧渗作用而进入土壤中的水分又通过地表的蒸发作用而使洼地土壤产生盐渍化。根据

表1 黄河湿润区地下水位的月变化 (m)

观察井位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
原阳县大宾村	1.28	1.32	1.30	1.53	1.71	—	0.82	0.90	0.84	1.12	1.20	1.30
郑州刘家堤口	1.44	1.23	1.30	1.61	1.97	1.43	0.89	0.37	0.39	0.98	1.19	1.46
封丘县关帝庙	1.22	1.22	1.23	1.44	1.24	1.36	0.99	0.23	0.23	0.49	0.81	1.07
封丘县水驿大队	1.27	1.31	1.23	1.55	1.62	1.73	1.27	1.08	1.01	1.35	1.52	1.60

宋荣华资料^①，堤北背河洼地区的地下水位经常保持在1—1.6m(表1)，而低于地下水临界深度。

也有人提出，本流域的浅层地下水还受深层承压水的补给，认为流域内的深层微承压水和浅层地下水是相互补给的^②。在旱季，浅层地下水因蒸发作用而消耗，则深层微承压水便予以补充。雨季，则由浅层地下水补充深层微承压水。而旱季，正值浅层地下水在强烈的地表蒸发作用下，地下水随土壤毛细管上升到土壤表面，水分蒸发后而留下盐分，加速土壤积盐返盐作用。还有人认为，随着深层地下水与浅层地下水的垂直交换过程或扩散作用，深层的积盐层的盐分可参加现代盐分累积过程^[2]，对此尚有待进一步研究。

作为本流域浅层地下水的两个主要补给源的大气降水和黄河水，矿化度并不高，其化学组成主要为钙、镁的重碳酸盐类，钠离子不是主要成份(表2)。但进入地下，补给地下水后，因水分不断蒸发而使盐分逐步浓缩，提高了矿化度，其盐分组成也由钙、镁的重碳酸盐类转变为镁、钠或钠、镁的重碳酸盐类，最后变为钠质的氯化物或硫酸盐—氯化物盐类，从而使水质复杂化(表3)。

表2 大气降水及黄河水的化学组成*

补源	pH	电导率 (mS/cm)	矿化度 (g/L)	阴离子含量 (me/L)					阳离子含量 (me/L)			
				CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
雨水	7.68	0.087	0.073	—	0.71	0.03	0.05	0.16	0.53	0.15	0.05	0.01
雪水	6.90	0.064	0.031	—	0.12	0.10	0.18	0.07	0.28	0.08	0.11	0.03
黄河水	8.18	0.740	0.505	—	3.49	1.29	2.00	0.12	2.80	1.66	2.71	0.11

* 1987年8月采取雨水、黄河水；雪水分析结果由张丽君提供。

表3 浅层地下水的化学组成

地点	pH	电导率 (mS/cm)	矿化度 (g/L)	阴离子含量 (me/L)					阳离子含量 (me/L)			
				CO ₃	HCO ₃ ⁻	SO ₄	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
应举乡7号井	8.18	1.450	1.171	0.55	10.71	0.27	4.27	—	2.77	3.73	9.10	0.10
潘店乡2号井	8.09	1.277	0.781	—	6.37	1.36	2.70	—	2.91	2.56	5.50	0.10
背河洼地* (朱元寨)	8.27	1.580	—	10.14		4.10	3.52	0.03	3.57	5.54	8.50	

* 背河洼地地下水资料由李加宏提供。

① 宋荣华、王世兴等，河南省黄河湿润盐渍区的形成和治理。黄淮海平原封丘县旱涝盐碱综合治理文集(三)，1982。

② 席荣琰，封丘县旱涝盐碱综合治理中地下水的利用和控制。黄淮海平原封丘县旱涝盐碱综合治理文集(二)，1982。

二、浅层地下水与土壤盐渍化

浅层地下水的含盐量与土壤含盐量有着密切的关系，在半干旱一半湿润季风气候条件下表现得尤为明显。土壤和地下水的水盐相互补给、相互作用是一种水盐平衡。当地下水及其盐分能够不断补充给土壤时，土壤即向积盐方向发展；而当水文地质条件改变，而切断或者大量减少地下水及其盐分对土壤的补给时，土壤便开始从积盐向脱盐方向转化。

(一)地下水径流特点与土壤盐分累积 地下水的上下、左右运动，直接影响到土壤水盐的重新分配。由于地下水的运动，受地形地貌条件、成土母质和土壤剖面性状的影响，因而，在不同的地段，地下水埋藏深浅、径流通畅与滞缓、地下水矿化度高低及水质类型等均有所差异，从而影响到土壤的积盐状况(表4)^[3,4]。

天然文岩渠流域浅层地下水埋深与流向主要受地形地貌条件控制，在部分地段还受骨干排水河道的影响。浅层地下水总的流向是西南—东北向，但不同地区也有差异^③。总的来说，该流域地势低平，排水不畅，地下水径流较弱，水力坡度一般为 $\frac{1}{5000}$ ，临黄河大堤及沙丘两侧坡降稍大，可达 $\frac{1}{1000}$

表4 不同地貌类型对地下水状况的影响

地貌类型		地下水埋藏深(m)	矿化度(g/L)	地下水化学类型
泛滥地	背河洼地	1—2	0.5	重碳酸盐型
	泛滥冲积平原	2—4	0.5—2	重碳酸盐—氯化物硫酸盐型
风沙地貌组合		4—6	1—2	重碳酸盐—氯化物硫酸盐型

$\frac{1}{5000}$ ，这种不良的水文地质条件，很不利于盐分随地下水流迁移。在强烈蒸发的季节里，浅层地下水中可溶性盐分随水分沿着土壤毛管迅速向上运行到土壤表层，使表土层强烈积盐。根据24个土壤盐分剖面的统计^[1]，0—1cm土层的含盐量为3.89%；1—5cm陡降至0.61%；5—10cm又降至0.18%，再往下盐分含量更少。盐分的表聚性，严重影响作物的出苗率和生长。

(二)浅层地下水埋深、矿化度与土壤盐分累积 在非灌溉区，浅层地下水埋深主要受地形地貌条件所控制，而潜水面的升降又控制着土壤积盐速度和强度。在天然文岩渠流域，土壤表层积盐的地下水临界深度，根据土体结构不同，一般在2—2.5m左右。地下水矿化度相同的条件下，地下水位越浅，蒸发作用越强，土壤积盐就越重。即使在地下水矿化度较低的情况下，如果地下水位较浅，但由于地下水因蒸发而进入土壤中的水分较多，久而久之，亦可使土壤产生盐渍化。例如，黄河浸润盐渍区的地下水矿化度只有1g/L左右，但该区70%—80%的土地发生盐渍化，且表土层含盐量竟高达1%以上。地下水位过高（经常保持在1—1.6m左右）是该流域普遍发生盐渍化的主要原因之一。只有将地下水位控制在临界深度以下，或者在土表放淤形成30cm的淤土层，土壤才不致发生盐渍化。

在地下水埋深基本相同的情况下，地下水矿化度越高，向土壤中补给的盐分就越多，因而土壤积盐越重。根据我们对该流域的浅层地下水样的分析与统计，矿化度小于1g/L的有117个，占水样总数的61.6%；1—2g/L的有51个，占水样总数的26.8%；大于2g/L的22个，

③ 席荣琰，黄淮海平原封丘县旱涝盐碱综合治理文集(二)，1982。

占水样总数的11.6%。由此可见,本流域绝大部分地区的地下水是处于低矿化度的状态。

(三)浅层地下水化学类型与土壤盐分累积及其组成的关系 浅层地下水盐分含量及其盐分组成对土壤的积盐速度和盐分组成有直接影响,虽然该流域浅层地下水矿化度不是很高,但由于在季风气候条件下,浅层地下水盐常年地补给土壤,因此,盐分在土壤的表层累积还是相当明显的。

1. 浅层地下水中盐分的累积及类型。从土壤发生分类学的观点来看,该流域的盐渍土多属于盐化潮土,主要受当地地下水的影响。在地下水位过高情况下,土壤在进行潮土化过程的同时,可能发生盐渍化过程。

一般来说,在黄河滩地、扇形地顶部、大沙河以及部分缓斜平原和有大量黄河水补给的背河洼地,它们的地下水矿化度在1g/L左右,盐分以重碳酸镁、钠盐为主;在地下径流缓慢的缓斜平地的中上部和出流滞缓常涝的淤土低平洼地,地下水矿化度一般为1—1.5g/L,主要以氯化物—重碳酸镁、钠质盐为主;而在地下水出流缓慢向滞缓地区过渡的地带,由于地下水位更接近于地表,受蒸发作用更为强烈,其矿化度一般在1.5—2.0g/L或>2.0g/L。随着矿化度的增高,水化学组成也有所变化,除有重碳酸盐外,氯化物和硫酸盐相应有所增加。此外,在封丘县的黄陵乡、尹岗乡一带,由于地下水处于闭流状态,在地下水蒸发浓缩的过程中,矿化度可高达3—5g/L。地下水的化学性质往往因矿化度的增高而变异,这主要是由于所含各种盐类的溶解度不同所致。重碳酸盐类溶解度最小,故随水分运行时率先析出,其次为硫酸盐,而氯化钠的溶解度最大,即使达到较高的浓度时仍呈溶液状态。当地下水矿化度很低时(一般在1g/L以下), HCO_3^- 含量比 SO_4^{2-} 和 Cl^- 高,即主要为重碳酸盐类;随着矿化度的增高(2g/L左右),则 SO_4^{2-} 含量高于 HCO_3^- ,即为重碳酸盐—硫酸盐类;当矿化度高至5g/L时, Cl^- 才显著占优势,并逐渐形成硫酸盐—氯化物和氯化物盐类,总之, Cl^- 含量是随矿化度的增大而增高的。

至于阳离子组成,在矿化度低时,以钙离子为主;随着矿化度增高则逐渐以钙、镁离子为主;最后钠离子占绝对优势。

2. 浅层地下水对土壤盐分累积及类型的影响。众所周知,土壤盐渍化的形成主要是由于地下水中的盐分通过土体毛管作用在表土层强烈累积的结果。因此,地下水的矿化度、离子组成深刻地影响土壤盐分的组成及其性质。由于天然文岩渠流域绝大部分地区地下水矿化度小于2g/L, Cl^- 含量又较高,因而分布着较大面积的硫酸盐—氯化物盐渍土。而在某些含有 SO_4^{2-} 的苦水地段,则分布着氯化物—硫酸盐盐土。根据Scofield、Magistad等人的见解,当溶性钠率(SSP)大于60%时,会引起土壤碱化。这与钠吸附比(SAR)的碱化值大于12是基本上相符合的。由于该流域地下水以重碳酸镁钠盐为主,又含有部分硫酸盐氯化物,再加之部分地区地下水显示有苏打累积现象,从而导致该流域同时存在着盐土、苏打盐土(碱化盐土)及碱土三种类型的盐渍化土壤。许多研究者曾指出^[2,5-7],易溶盐在土壤和潜水中的积聚存在着明显的一致性,易溶盐在潜水中积聚的各个阶段一般在土壤中也得到相应地反映,在剖面点和空间分布上存在着协调的现象。但易溶盐在潜水和土壤中的积聚存在以下的某些差异^[8]:

(1) 在地下水矿化度低(<1—2g/L)时,碳酸钠和重碳酸钠由潜水进入土壤,并在土壤中逐渐累积,所以土壤容易产生苏打化。

(2) 土壤溶液中的硫酸盐与地下水中的硫酸盐相比较,前者更易在土壤中积聚。

(3) 随着地下水矿化度的增高(>4g/L), Cl^- 占绝对优势。由于氯化物的溶解度较大和

迁移能力较强,能频繁地运行于潜水—土壤之间。但由于土壤对氯化物的吸附和累积能力较弱,因此,氯化物在地下水中更易积聚,但在某些条件下,氯化物在土壤中的积累也高于潜水。

(四)碱性的低矿化水对苏打盐化土壤和碱化土壤形成的影响 根据我们对190个地下水样化学组成的分析,本流域的地下水化学组成以钙、镁、钠的重碳酸盐为主,部分水样以氯化物—硫酸盐为主。这种碱性的低矿化度的地下水与该地区苏打盐土和碱化土壤的形成有密切的关系。

1. 苏打盐土主要是由含有较多碳酸钠(即残余碳酸钠)的地下水在地表蒸发后,在地表累积大量苏打盐而形成的。在该流域内,苏打盐土主要分布在背河洼地或零星分布于其它盐土之中,亦常与瓦碱土呈复区分布,很少以大片连续的苏打盐土存在。苏打盐土的盐分在剖面中的分布特征与一般盐土相似,但其碱性系数($K = \frac{CO_3^{2-} + HCO_3^-}{Cl^- + SO_4^{2-}}$)较高, pH值通常可达9以上,钙、镁的含量都极低,基本上不能生长作物。

在背河洼地,地下水位超过临界深度的弱矿化重碳酸盐型地下水,通过毛细管作用亦可上升至地表,并在表土层累积重碳酸盐而形成苏打盐土。

在因水文地质条件发生变化,造成地下水位升高的地段,瓦碱土亦可因复盐而演变为苏打盐土;如果水位下降了,苏打盐土又可转化为瓦碱土。在这种条件下形成的苏打盐土与瓦碱土的剖面特征有相似性,与瓦碱土的主要区别在于它的含盐量增大,在盐分组成上主要是氯离子的比重增大。

2. 瓦碱土主要集中分布在封丘县的应举乡、黄德乡北部、潘店乡之南的段堤、马牧、祝店一带,面积约11万亩。大部分瓦碱土的地下水埋深多在2—2.5m左右,矿化度1—2g/L,属重碳酸盐—氯化物或重碳酸盐—硫酸盐型,水中常含有残余碳酸钠。实验证明^[9],该流域瓦碱土的形成主要是钠质盐渍土在积盐和脱盐频繁交替的过程中,钠离子进入土壤吸收性复合体;其次为碱性低矿化地下水中重碳酸钠和碳酸钠在上升积累过程亦可使土壤产生了碱化。

参 考 文 献

- [1] 王遵亲主编,黄淮海平原治理与开发研究文集。科学出版社,1987。
- [2] 王遵亲等,山东聊城盐渍土的形成条件及其分布规律。土壤学报,11(4):343—359,1963。
- [3] 中国农业科学院农田灌溉研究所等编,黄淮海平原盐碱地改良。农业出版社,1977。
- [4] 陈正宜主编,天然文岩渠流域遥感应用研究。天然文岩渠地区盐渍化土类型及其分布规律的遥感图像分析,科学出版社,1987。
- [5] 中国科学院、水利电力部编著,华北平原土壤。科学出版社,1961。
- [6] B. A. 柯夫达,盐渍土的发生与演变。科学出版社,1964。
- [7] B. A. 柯夫达,中国之土壤与自然条件概论。科学出版社,1960。
- [8] 石元春、辛德惠等著,黄淮海平原的水盐运动和早涝盐碱的综合治理。河北人民出版社,1983。
- [9] 俞仁培、杨道平、石万普、蔡阿兴著,土壤碱化及其防治。农业出版社,1984。